

A HOMLOKMARÁS KUTATÁSÁNAK FŐBB EREDMÉNYEI 1. RÉSZ: A FORGÁCSOLÓERŐ VIZSGÁLATA

Makkai Tamás 

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

Absztrakt

A síkfelületek megmunkálásának egyik legtermelékenyebb és leghatékonyabb eljárása a homlokmarás, mivel képes az anyagot a munkadarabról nagy sebességgel eltávolítani, egyúttal kiváló minőségű megmunkált felület állítható elő. Emiatt számos kutatás fő témája a homlokmarás, az egyik legjelentősebb kutatási irány a forgácsolóerők becslése/meghatározása. Ebben a cikkben e kutatási terület szakirodalomban megjelent eredményeit foglalom össze.

Kulcsszavak: homlokmarás, szakirodalmi összefoglalás, forgácsolóerő meghatározása, forgácsolóerő előrejelzése

Abstract

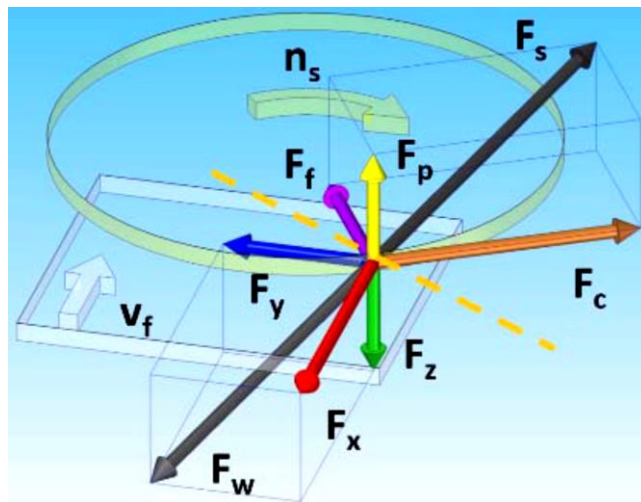
One of the most productive and efficient procedures of machining flat surfaces is face milling, as it is able to remove material from the workpiece at a high speed while producing a high-quality machined surface. For this reason, the main topic of much research is face milling, one of the most important research directions is the prediction/determination of cutting forces. In this paper, I summarize the results of this research area published in the literature.

Keywords: face milling, literature review, cutting force determination, cutting force prediction

1. Bevezetés

A forgács leválasztását megvalósító alakító erő a forgácsolóerő. Nagysága és iránya meghatározó a mechanikai rendszer összetevőinek mechanikai terhelhetősége miatt. A forgácsolóerőt szokás komponensekre bontani a kitüntetett irányok szerint, homlokmarásnál az 1. ábrán (Kundrák et al., 2018a) látható kétféle derékszögű koordináta-rendszerben lehet ezeket értelmezni. A munkadarabhoz kötött álló, jobsodrású koordináta-rendszerben a forgácsolóerő (F_w) három egymásra merőleges összetevőre van felbontva, egyik az előtolással párhuzamos irányú (F_x), másik a megmunkált felületre merőleges (a főorsó forgástengelyével párhuzamos) irányú (F_z), a harmadik összetevő pedig ezekre merőlegesen adódik (F_y). A szerszámhoz kötött forgó koordináta-rendszerben szintén három egymásra merőleges összetevőre van felbontva az eredő forgácsolóerő (F_s), érintőirányú (F_c), sugárirányú (F_f) és ezekre merőleges (F_p) irányú összetevőkre. A forgácsolóerő mérése az összetevőinek mérésével történik, a forgácsolási adatok különböző beállításaival elvégzett kísérletek során. A kutatók a mérési adatokat feldolgozva vizsgálják a forgácsolási paraméterek hatását a forgácsolóerő összetevőire, de a vizsgálatok más szempontok szerint is zajlanak, mint például a szerszámkopás, a rezgések vagy a szerszám geometria hatásának elemzése. A forgácsolóerő kutatásában megjelent és elterjedt a számítógépes szimuláció alkalmá-

zása, mely a valós forgácsolási kísérletekhez képest gazdaságosabban megvalósítható. Az elvégzett szimulációs kísérletek egy részét valós forgácsolási kísérletekkel is végre szokták hajtani, ezzel igazolható a szimulációs eredmények hitelessége. Az erőmérés adatainak feldolgozásával feltárható a homlokmarás jellemzőinek, paramétereinek a forgácsolóerő összetevőivel való kapcsolata, melyből különböző módszerek alkalmazásával különféle mechanikai, matematikai modellek születtek. A cikk összefoglalja a homlokmarás területén a forgácsolóerő vizsgálatával kapcsolatban megjelent szakirodalmi eredményeket.



1. ábra. A forgácsolóerő és összetevői homlokmarásnál (Kundrák et al., 2018a)

2. A forgácsolóerő méréséből származó eredmények, megállapítások

Andersson és szerzőtársai kifejlesztettek egy forgácsolóerő modellt a többlapkás forgácsolási folyamatokhoz (Andersson et al., 2011). Elemezték, hogy a paraméterek milyen mértékben befolyásolják a kiválasztott szerszámgeometria esetén a teljes forgácsolóerő változását. Megállapították, hogy az új lapkával rendelkező szerszámnál a forgácsolóerő változását főleg három tényező befolyásolta. A forgácsolóél radiális és axiális helyzete a vizsgált esetben az erőváltozások körülbelül 50%-át okozta, 40% az excentricitásból és 10% pedig az orsó kihajlásából származott.

Tomíček és Molotovnik az Inconel 738LC anyagon elvégzett számos megmunkálási kísérletet és archivált eredményeket elemezték (Tomíček és Molotovnik, 2016). Feltárták a profilmarás alapvető problémáit az adott anyagra vonatkozóan. Meghatározták a szerszámgeometria és a geometriai korlátok összefüggéseit és hatásukat a profilmarás során. A szerszámkopást és a forgácsolóerőt mérték és értékelték, majd ajánlást tettek a vizsgált anyag megfelelő megmunkálásához.

A forgácsolóerő és a felületi érdesség változásait a fogásmélység (a_p) és a fogankénti előtolás (f_z) megváltoztatásával tanulmányozták Kundrák és szerzőtársai homlokmarásnál (Kundrák et al., 2017a). Az f_z növelésével az A_c deformálatlan forgácskeresztmetszet állandó értéken tartásával az a_p/f_z arányt öt fokozatban 0,5-ről 8-ra változtatták. Azt tapasztalták, hogy a fogankénti előtolás növelésével a forgácsolóerő mindhárom erőösszetevőjének értéke csökkent. Ennek megfelelően csökkent a forgácsoláshoz szükséges mechanikai teljesítmény is. A felületi érdesség vizsgálatának eredményei azt mutatták, hogy az előtolás fokozatos növekedésével a kisebb előtolásoknál jelentős volt az érdesség növekedés ($a_p/f_z = 2,5$ -ig), majd ezt követően mérsékelten növekedett.

Habrat és szerzőtársai azt vizsgálták, hogy a tiszta titán (mikro- és nanokristályos) szemcsemérete befolyásolja-e a forgácsolóerő összetevőit és a mart felület érdességét (Habrat et al., 2016). A forgácsolóerő tangenciális komponensének értékei a nanokristályos titán marása során 40%-kal alacsonyabbak voltak, mint a mikrokristályos titánnál. A radiális komponens értékének összehasonlítása nem mutatott szignifikáns különbségeket a kapott eredmények között. A forgácsolóerők összetevőinek modelljei a fogásmélység és az előtolás jelentős hatását mutatták a forgácsolási paraméterek vizsgált tartományában. Az elemzésük a nanokristályos titán marása során a felületi érdesség kialakulásának meglehetősen összetett jellegét tárta fel.

Korkut és Donertas acél munkadarabok homlokmarásakor a forgácsolóerők három összetevőjét mérték dinamométerrel (Korkut és Donertas, 2007). A forgács keresztmetszetétől és a forgácsoló sebességtől függően a két acél munkadarab forgácsolóerőit és felületi érdességét értékelték. A forgácsolási paraméterek bizonyos tartományán belül a növekvő forgácsoló sebesség növelte a forgácsolóerőt, míg kisebb és közepes forgácsoló sebességnél a szerszám élrátét képződési hajlamának tendenciája nőtt. A forgácsolóerők az előtolás és a fogásmélység növekedésével növekedtek. A felületi érdességmérések azt mutatták, hogy a növekvő forgácsoló sebesség kisebb érdességi értékeket eredményezett.

A forgácsolóerők elméleti modellezésének és szimulációjának egy új megközelítését ismertették Zheng és szerzőtársai a homlokmarásnál (Zheng et al., 1999). Egy prediktív megmunkálási elmélet alapján a maró működését számos egyélű forgácsoló szerszám egyidejű munkájaként modellezték. A marási erőket a munkadarab anyagának tulajdonságai, a maró paraméterei, a fogak geometriája, a forgácsolási feltételek és a marási eljárásváltozatok alapján lehet előrejelezni. Egy másik cikkükben (Li et al., 2000) figyelembe vették a szerszám és a munkadarab rezgési viszonyait, az egyes marófogak és a munkadarab közötti szakaszos érintkezés hatását is a forgácsolási zóna hőmérsékletére, valamint a maró ütőshibájának hatását a deformálatlan forgácsvastagságra. Marási kísérletekkel validálták a modellt, a kísérleti és a szimulált eredmények közötti jó egyezést találták.

Subramanian és szerzőtársai egy olyan statisztikai modellt dolgoztak ki, amely előrejelzi a forgácsolóerőt a forgácsoló sebesség, az előtolás és az axiális fogásmélység alapján (Subramanian et al., 2013). Válaszfelületi módszertani kísérlettervezést használtak a kísérletek megvalósításához. A forgácsolóerő előrejelzésére másodrendű matematikai modellt fejlesztettek ki a megmunkálási paraméterek felhasználásával. A prediktív modellek megfelelőségét varianciaanalízissel tesztelték. A megmunkálási paraméterek optimalizálása a minimális forgácsolóerő elérése érdekében genetikai algoritmusokkal történt. Megállapították, hogy a forgácsoló sebesség volt a domináns tényező a másodrendű modellekben, ezt követte az előtolás és az axiális fogásmélység. A nagyobb forgácsoló sebesség, a kisebb előtolás és a kisebb axiális fogásmélység kisebb forgácsolóerőt eredményezett.

Čekić és szerzőtársai a forgácsolási paraméterek hatását vizsgálták edzett, ötvöztött acél nagysebességű homlokmarása során (Čekić et al., 2013). Az ultranagysebességű homlokmarás során mért forgácsolóerők eredményei megerősítették, hogy a forgácsoló sebesség növelése a forgácsolóerők csökkenését okozza. A vizsgálatok azt is kimutatták, hogy a fogankénti előtolás jelentős hatással van a forgácsolóerők értékére. Kifejlesztettek egy matematikai modellt a forgácsolóerő kiszámításához a nagysebességű homlokmarásnál. A kísérleti eredményeket összehasonlították a számítási eredményekkel, mely szerint a matematikai modell jól leírja az eredő forgácsolóerőt a forgácsoló sebesség és a fogankénti előtolás függvényében nagysebességű homlokmarás során.

Annak érdekében, hogy tanulmányozzák a folyamat tényezőinek a forgácsolóerőre és a rezgésekre gyakorolt hatását a forgácsolási folyamatokban, Chuangwen és szerzőtársai marási vizsgálatokat végeztek különböző eljárási körülmények között rozsdamentes acélon bevonatos keményfém lapkás maróval

(Chuangwen et al., 2018). Megállapították, hogy a folyamat tényezői közül a szerszám kopása és a fogásmélység jelentősen befolyásolja a forgácsolóerőt és a rezgést.

Pathak és szerzőtársai két Al-ötvözet (Al-Fe-V-Si) megmunkálhatóságát vizsgálták gyorsacél szerszámmal történő homlokmarásnál (Pathak et al., 2013). Megfigyelték, hogy a fogásmélység növekedésével a 2%-os Fe-tartalmú ötvözetnél a forgácsolóerők nagyobb mértékben nőttek az 1%-osnál mértékhez képest, míg más paraméterek változása esetén ilyen nem tapasztaltak. Az elvégzett mérések megerősítették, hogy a forgácsolóerők a fogásmélység növekedésével, valamint az előtolás növekedésével nőnek, míg a forgácsoló sebesség növekedésével csökkennek. A felület minősége jelentősen javult a forgácsoló sebesség növekedésével és az előtolás csökkenésével a vizsgált tartományon belül. A forgács alakját, méretét és vastagságát mindkét ötvözetben szinte minden körülmények között azonosnak találták, ezért arra következtettek, hogy az ötvözet nincs hatással a forgács morfológiájára/vastagságára.

Subramanian és szerzőtársai azt vizsgálták, hogy az orsó fordulatszáma, az előtolás, az axiális és radiális fogásmélység, valamint a szilíciumkarbid részecskék tömegaránya hogyan befolyásolják a forgácsolóerőt és a felületi érdességet (Subramanian et al., 2017). A matematikai modell létrehozásához másodrendű válaszfelületi módszert alkalmaztak. A modell megfelelőségét varianciaanalízissel ellenőrizték. A folyamatparaméterek közvetlen és kölcsönös hatásait tanulmányozták annak érdekében, hogy a forgácsolóerő és a felület érdessége minimális legyen.

Kilickap és szerzőtársai azt tanulmányozták, hogy a különböző forgácsolási paraméterek, mint például a forgácsoló sebesség, az előtolás és a fogásmélység milyen hatással vannak a forgácsolóerőre, a felületi érdességre és a szerszámkopásra a Ti-6242S ötvözet keményfém szerszámmal való marásánál (Kilickap et al., 2017). A kísérletekből nyert adatokat mind a mesterséges neurális hálózat, mind a válaszfelületi módszertan alkalmazásával is meghatározták. A kapott értékek nagyon közel álltak a kísérleti vizsgálatokból kapott adatokhoz. A legkisebb forgácsolóerőt és felületi érdességet nagy forgácsoló sebesség mellett, kis előtolási sebességgel és kis fogásmélységgel érték el. A minimális szerszámkopást kis forgácsolási sebességnél, kis előtolásnál és kis fogásmélységnél érték el.

Malghan és szerzőtársai megvizsgálták egy alumínium ötvözet (AA 6061) homlokmarással történő megmunkálási jellemzőit (Malghan et al., 2018). A forgácsolóerő közvetett megközelítéssel történő kiszámításához a megmunkálás során az egyes tengelyek mentén való elmozdulást megvalósító motorok által felvett árammal kapcsolatos adatokat rögzítették. A kísérleti tervet a Taguchi megközelítés alkalmazásával hajtották végre a kísérleti költségek minimalizálása érdekében. Az ANOVA eredmények azt jelezték, hogy a megalkotott matematikai modell hatékonyan alkalmazható. Azt tapasztalták, hogy a forgácsolóerőt nagymértékben befolyásolja a forgácsoló sebesség, az előtolás és a fogásmélység, a felület érdessége lineárisan növekszik az előtolással. Jobb felületminőség érhető el, ha kisebb előtolást, nagyobb forgácsoló sebességet és nagyobb fogásmélységet alkalmaznak az adott anyaghoz.

A homlokmarással végzett forgácsolási kísérletekkel a fogásmélység és a fogankénti előtolás arányának hatását elemezte Sztankovics és Kunderák az erőkomponensek értékeire és azok arányára (Sztankovics és Kunderák, 2017). Arra a következtetésre jutottak, hogy a forgácsleválasztási folyamatot kedvezően befolyásolhatja az előtolás növekedése és a fogásmélység csökkenése állandó forgácskesztmetszet esetén. Így a forgácsolóerő minden összetevője és ezáltal a szükséges teljesítmény jelentősen csökkenthető.

Kunderák és szerzőtársai a forgácsarány változásának hatását vizsgálták a forgácsolóerő összetevőinél (Kunderák et al., 2017a; Kunderák et al., 2017b). Megállapították, hogy a vizsgált tartományban a fő- és mellékél szerepe felcserélődött. Az előtolás növelésével a forgácsolóerő közel lineárisan nőtt, azaz az előtolás növeléséhez nagy merevségű szerszámgépre van szükség állandó fogásmélység alkalmazásánál.

Kundrák és szerzőtársai a forgácsolóerőt vizsgálták homlokmarásnál (Kundrák et al., 2018b; Kundrák et al., 2018c). A munkadarabhoz kötött koordinátarendszerben mérték az erőket, majd ezekből meghatározták a szerszám éléhez kötött koordinátarendszerben értelmezett erőket. Állandó fogásmélység mellett az előtolás növelésével a vizsgált tartományban a felületképzési sebesség arányosan 16-szorosára nőtt, az f_z növekedésével az a_p/f_z arány arányosan csökkent. A munkadarab koordinátarendszerében mért forgácsolóerők nőttek, arányuk megváltozott. A fajlagos erők értéke viszont csökkent az előtolás növelésével. A nagyobb forgácsolási sebesség esetén kisebb forgácsolóerőket mértek.

A forgácsoló lapkák alakja és a szerszám élgeometriája hatással van a forgácsdeformációra, meghatározza a forgácskeresztmetszet alakját. Ezáltal a forgácsolóerő összetevőinek az arányát is befolyásolja. Számos kutatás foglalkozik a szerszám élgeometria hatásának elemzésével. Karkalos és szerzőtársai paralelogramma alakú lapkával homlokmarási kísérleteket végeztek annak vizsgálatára, hogy a fogásmélység és a forgácsolási sebesség különböző értékei milyen hatással vannak a forgácsolóerőkre és a fajlagos forgácsolóerőkre (Karkalos et al., 2019a). Állandó előtolás mellett két különböző fogásmélység esetén, négy különböző forgácsoló sebességgel elvégzett kísérletek eredményeit hasonlították össze. Azt tapasztalták, hogy a lapkára ható F_c forgácsolóerő arányosan változik a fogásmélység változásával, és ez az arány a különböző forgácsolási sebességeknél is megmarad, míg a forgácsolási sebesség változása gyakorlatilag nem befolyásolja az F_c értékét. Egy másik cikkükben két különböző fogásmélységgel és négy különböző forgácsoló sebességgel, azonos forgácskeresztmetszet alkalmazásával elvégzett kísérleteket elemeztek (Karkalos et al., 2019b). Megállapították, hogy az A_c állandó értéken tartásával és az előtolás növelésével, azaz az a_p/f_p arány csökkenésével csökken a forgácsolóerő és a felvett teljesítmény is. A fogásmélység növekedése esetén, állandó A_c mellett, azaz az a_p/f_p arány növekedésével az F_x komponens növekedett, míg az F_y értéke kismértékben nőtt, az F_z értéke azonban kissé csökkent. Kundrák és szerzőtársai különböző homlokmarási kísérleteket végeztek acél munkadarabokon, hogy megvizsgálják a fogásmélység hatását mind állandó, mind változó forgácskeresztmetszet esetében azért, hogy meghatározzák annak fontosságát a homlokmarásban (Kundrák et al., 2019a). Makkai állandó fogásmélység és állandó forgácsoló sebesség mellett ötféle fogankénti előtolást alkalmazva vizsgálta az előtolás hatását a forgácsolóerőkre korrózióálló acél homlokmarásakor (Makkai, 2020a). A forgácsolóerő és a fajlagos forgácsolóerő változása azt mutatta, hogy mind nagyságában, mind az erőösszetevők változásának arányában jelentős az eltérés a különböző előtolás értékek mellett. Azt tapasztalta, hogy korrózióálló acél esetében is a nagyobb előtolások alkalmazása előnyösebb energetikailag.

Kundrák és szerzőtársai megvizsgálták az előtolás és a forgácsoló sebesség hatását a forgácsolóerőkre és a fajlagos forgácsolóerőkre négyzet alakú forgácsolólapkával végzett homlokmarás során (Kundrák et al., 2020). Makkai és társai kísérleti vizsgálatot végeztek a forgácsoló sebesség és az előtolás forgácsolóerőkre gyakorolt hatásának, valamint a homlokmarás során fellépő fajlagos forgácsolóerők hatásának meghatározására kör alakú lapka alkalmazása esetén (Makkai et al., 2019). Mindkét kísérletsorozatban megállapították, hogy a nagyobb erők a Z tengelyen hatnak, az előtolás növekedése leginkább az F_y komponenst, míg a forgácsoló sebesség növekedése leginkább az F_z komponenst érinti. Makkai a fogankénti előtolás (Makkai, 2022) és a forgácsoló sebesség (Makkai, 2020b) változásának hatását vizsgálta a forgácsolóerő és a fajlagos forgácsolóerő összetevőire nyolcszögletű lapka alkalmazásával.

Kundrák és szerzőtársai megvizsgálták a különböző forgácsolólapkák geometriai jellemzőinek hatását a forgácsolóerőre és a fajlagos forgácsolóerő összetevők értékeire homlokmarás esetén annak érdekében, hogy meghatározzák a megfelelő forgácsoló élgeometriájú lapkát, amely a legalacsonyabb energiafogyasztást eredményezi azonos leválasztott anyagterefogat esetén (Kundrák et al., 2019b). Forgácsoló

lólapkánként öt különböző fogankénti előtolás értékkel, 0,1-0,8 mm/fog tartományban végeztek kísérleteket, majd elemezték a forgácsolóerő és a fajlagos forgácsolóerő összetevők maximális értékeinek változását a különböző kísérleti körülmények függvényében. A kísérleti eredmények azt mutatták, hogy a mért forgácsolóerő-összetevők alapján és a minimális energiafelhasználás érdekében a lapkák alak szerint a következő sorrendben ajánlhatók felhasználásra a vizsgált tartományon: téglalap, négyzet, kör.

Makkai állandó fogásmélységet és állandó forgácsoló sebességet alkalmazva az előtolásnak a forgácsolóerő összetevőire gyakorolt hatását vizsgálta (Makkai, 2020c). Nyolcszögletű homlokmaró lapkát alkalmazva ötféle fogankénti előtolással ötvözetlen acél munkadarabon végzett kísérleteket. A kísérletek eredményeit az előző kísérletek eredményeivel együttesen felhasználva a fajlagos forgácsolóerő változását vizsgálta a négy különböző lapkageometriánál. Azt tapasztalta, hogy a négyféle vizsgált lapka alkalmazása a forgácsolóerők alapján a kísérleti feltételek mellett az alábbi sorrendben javasolt: téglalap, négyzet, nyolcszög, kör alakú lapka.

3. Szimulációs technikák alkalmazása a forgácsolóerő becslésére

Karpuschewski és szerzőtársai megfogalmazták homlokmarásnál az inverz forgácsolás elméleti alapjait, a forgácsolóerő képződést inverz marással szimulálták AdvantEdge szoftverrel (Karpuschewski et al., 2017). Összehasonlították a hagyományos és az inverz homlokmarás során a forgácsolóerőket. Forgácsolási kísérleteket végeztek a 3D FEM szimuláció eredményeinek megerősítésére. A 3D FEM szimulációk és a forgácsolási kísérletek igazolták, hogy homlokmarásnál a forgácsolási arány 10-ről 0,1-re történő csökkentése állandó deformálatlan forgácsolóerő esetében az F_c főforgácsolóerő és az F_f radiális erő jelentős csökkenését és az F_p passzív erő kétszeres növekedését okozta. Az eredő erő is jelentősen csökkent, ami a forgácsolóerő képződés és -áramlás mechanizmusait megváltoztatta, a homlokmarás stabilabb lett.

Borysenko és szerzőtársai bemutatták az inverz forgácsolási arány ($b/h < 1$) és a makro forgácsolási geometria hatását a forgácsolóerő képződésre, a marási erőkre, a szerszám kihajlására, valamint a munkadarab felületi integritására homlokmarásnál (Borysenko et al., 2019). A vizsgálatok a DoE (Design of Experiment) módszerrel alapultak véges elemes szimulációval és valós kísérletekkel. A forgácsolóerő jelentős csökkenését is sikerült elérni inverz forgácsolási arány alkalmazásával. Ennek megfelelően a szerszám tengelyétől való elhajlása csökkent. Ezzel párhuzamosan a munkadarab felületének maradó húzófeszültségei inverz forgácsolási aránynál megnövekedtek.

Felhő és Rakonczi bemutatták a változó a_p/f_z aránynak a hatásait a különböző forgácsolóerő összetevőkre, mind a munkadarabra, mind a szerszámra ható erők vonatkozásában (Felhő és Rakonczi, 2019). Az erőértékeket FEM szimulációval határozták meg, majd az eredményeket forgácsolási kísérletekből nyert adatokkal validálták. Megállapították, hogy az azonos deformálatlan forgácsolóerő képződés eltávolítása az a_p/f_z arány csökkentésével (az f_z növelésével és az a_p egyidejű csökkentésével) pozitív hatással lehet a homlokmarás erőkomponenseire.

Felhő bemutatta a munkadarabra ható forgácsolóerő-komponensek (F_x , F_y , F_z) véges elemes modellezését homlokmarásnál AdvantEdge FEM szoftver alkalmazásával (Felhő, 2020). Bemutatta a lapka forgácsolóerő sugárának optikai módszerrel történő mérését. A szimulált forgácsolóerő értékeket valós mérési adatokkal hasonlította össze és jó korrelációt talált közöttük.

Akkad és Felhő bemutatták a munkadarab koordináta-rendszerében értelmezett erőkomponensek (F_x , F_y , F_z) értékeinek változásait a homlokmarás során, amely a fogásmélység és az előtolás értékeinek változásából adódott (Akkad és Felhő, 2019). A homlokmarási művelet három erőkomponensének értékeit az AdvantEdge véges elemes szoftverrel kapták meg. Szimulációkat végeztek öt különböző fogás-

mélység és előtolás mellett, hogy összehasonlítsák a kapott értékeket. Azt tapasztalták, hogy a hagyományos forgácsolásnál az erőkomponensek az a_p/f_z érték csökkenésével nőttek. Az inverz forgácsolásnál az erőösszetevők az a_p/f_z érték csökkenésével csökkentek. Nagy előtolási sebességet használva homlokmarásnál törekedni kell arra, hogy inverz forgácsolási körülmények között dolgozzanak azért, hogy kisebb erők hassanak, ami a használt gép kisebb energiafogyasztását, nagyobb stabilitást okozza a marás során, ill. hosszabb szerszámélettartamot biztosít.

4. A forgácsolóerő modellezése

A forgácsolóerőket, a keményfém lapka felületi hőmérsékletét, valamint az elsődleges és másodlagos forgácsolóképződés mechanizmusát tanulmányozta Chang rozsdamentes acél fazettás élű szerszámmal való homlokmarásánál (Chang, 2005). A forgácsolóerők elméleti értékeit kiszámította és összehasonlította a kísérleti eredményekkel. A kísérletekből származó erő adatokat a mechanikai modell empirikus állandóinak becslésére és előrejelzési képességeinek ellenőrzésére használta fel. Az előrejelzett és a mért erők összehasonlítása jó egyezést mutatott.

Ghorbani és Moetakef-Imani egy új módszert ismertettek a fajlagos forgácsolóerő együtthatóinak meghatározására a kör alakú lapkákkal végzett, elárasztásos hűtéssel történő homlokmaráshoz (Ghorbani és Moetakef-Imani, 2016). Első lépésben egy inverz módszert javasoltak a mechanikai erőmodell egyenleteinek megoldására genetikai algoritmussal, amely egy hatékony optimalizálási módszer. Mesterséges neurális hálózat modelleket fejlesztettek ki, hogy megbecsüljék a fajlagos forgácsolóerő együtthatókat. A modellek hatékonyságának értékelése érdekében kiterjedt kísérleti forgácsolóerő eredményeket hasonlítottak össze az algoritmussal kapott eredményekkel, mely jó egyezést mutatott. Megvizsgálták a forgácsoló sebesség, a fogankénti előtolás és a fogásmélység kölcsönhatását a fajlagos forgácsolóerő érintő- és radiális irányú együtthatóinak változásaival. Az eredmények azt mutatták, hogy adott forgácsolási feltételek mellett a kör alakú lapka élgeometriája jelentősen befolyásolja az együtthatók értékét.

Nguyen a forgácsolóerő modellezési módszerét, valamint az elméleti és kísérleti módszerek kombinált megközelítését mutatta be a homlokmarási folyamatban paralelogramma lapka alkalmazásával (Nguyen, 2021). Az elméleti módszerrel a forgácsolóerők modellezése a maró geometriája, a forgácsolási feltételek, valamint a forgácsolóerő együtthatók matematikai leírásával történt. A kísérleti módszerrel az átlagos forgácsolóerők mindhárom irányban jól korreláltak, mivel az élenkénti előtolás lineáris függvényeinek determinációs együtthatói meglehetősen nagyok lettek. A forgácsolóerő modelleket sikeresen validálta az előrejelzett forgácsolóerők és a mért forgácsolóerők alakjának és értékeinek összehasonlításával.

Ma és szerzőtársai új forgácsolóerő modellezési módszert javasoltak íves felületek nagy sebességű marására nehezen megmunkálható anyag esetében (Ma et al., 2016). A leválasztandó anyagréteg vastagságának és a forgácsoló szerszám által bejárt területnek a számítási módszereit mutatták be íves felületre a gömbvégű maróval végzett marási folyamatban. A kísérleti eredmények azt mutatták, hogy a javasolt forgácsolóerő modell hatékonyan képes előre jelezni a forgácsolóerő amplitúdóját és a változásának trendjét.

Biró és Szalay a fajlagos forgácsolóerő empirikus modelljének kiterjesztését mutatták be finomforgácsolási eljárásokra a deformálatlan forgácsvastagság egy új határszakaszának azonosításával (Biró és Szalay, 2017). Egy nagy szilárdságú szerkezeti acél homlokmarása során $h=3...4 \mu\text{m}$ -es deformálatlan forgácsvastagságra vonatkoztatva figyelték ezt meg. Az új határ forgácsvastagság értékét a forgácsolóél

mikrogeometriájára és a forgácsolási paraméterekre vonatkoztatva a képlékenyen deformálható anyagréteg vastagságának alsó határértékének előrejelzésére alkalmazzák. Ennek átlagértéke leginkább az előtolási sebességtől függ.

Biró és szerzőtársai az elméleti forgácskeresztmetszet és a forgácsolási sebesség hatásait vizsgálták a fajlagos forgácsolóerőre nagy szilárdságú szerkezeti acél homlokmarási kísérleteivel (Biró et al., 2015). A fajlagos forgácsolóerő több szakaszos exponenciális függvényként modellezhető. Új kritikus forgácsvastagságot azonosítottak és megállapították, hogy a forgácsoló sebesség csökkenő hatással van a fajlagos forgácsolóerőre.

Zhang és szerzőtársai egy mechanikai marási erő modellt állítottak össze és validálták nagy sebességű marási kísérletekkel (Zhang et al., 2019). A fajlagos forgácsolóerő összetevői mérethatást mutattak, a fogankénti előtolás, az axiális marási mélység és a radiális marási szélesség csökkent. A mérethatást figyelembe vevő általános mechanikai forgácsolási teljesítmény modellt marási kísérletek során forgácsolási teljesítmény mérésekkel validálták. A fajlagos forgácsolási energia a fordulatszám, a fogankénti előtolás, az axiális fogásmélység és a fogásszélesség csökkenésével nőtt, az orsó üresjárat energiája miatt. Az energiahatékonyság a marási paraméterek növekedésével növekszik, a nagyobb anyagleválasztási sebesség (MRR) és a fajlagos leválasztott térfogatban csökkenő üresjárat teljesítmény miatt. Nagy sebességű marásnál nagyobb fogankénti előtolás javasolt a nagyobb energiahatékonyság miatt.

Rubeo és Schmitz egy összehasonlító tanulmányt mutattak be, amely a forgácsolóerő összetevőinek a marási folyamat paramétereitől való függését vizsgálta, beleértve a fogankénti előtolást, az orsó fordulatszámát és a radiális fogásmélységet (Rubeo és Schmitz, 2016). Részletezték a mechanikai erőmodellt és bemutatták a modell kalibrálásának (forgácsolóerő összetevők meghatározásának) módszereit. Leírták a marási folyamat paramétereinek tartományához tartozó, az „átlagos erő, lineáris regresszió” és a „pillanatnyi erő, nemlineáris” optimalizálási módszerek felhasználásával kiszámított forgácsolóerő összetevőket. A „pillanatnyi erő, nemlineáris” optimalizálási módszert marási stabilitási vizsgálatok keretében validálták. Megállapították, hogy a nehezen megmunkálható anyagokhoz gyakran javasolt alacsony előtolás aránytalanul nagyobb fajlagos forgácsolási erőt produkál, mint a nagy előtolás, különösen kis radiális fogásmélységű marásnál. A nagy előtolás növeli a kritikus axiális fogásmélységet, amely alatt minden orsó-fordulatszám stabil marási műveletet eredményez.

Pratap és szerzőtársai egy titánötvözet végeeselemes módszeren (FEM) alapuló, mikromarási forgácsolóerő modellezését mutatta be, figyelembe véve a szerszámél, a deformálatlan forgácsvastagság, a forgácsoló sebesség és az előtolás hatásait (Pratap et al., 2015). A FEM-modellhez Johnson-Cook konstitutív egyenletet használtak, figyelembe véve a deformáció, az alakváltozási sebesség és a hőmérséklet hatását az anyagtulajdonságra és a forgácsleválasztás kritériumának tekintett tönkremeneteli paraméterekre. A feszültségeloszlást, a hőmérséklet-eloszlást és a forgácsolóerőket ABAQUS/Explicit 6.12 szoftverrel szimulálták, figyelembe vették a szerszám élsugarának a hatását. A forgácsolóerő előrejelző modell eredményeit mikromarási kísérletekkel validálták. Az előrejelzett forgácsolóerő eredmények tendenciája jó egyezést mutat a kísérleti eredményekkel.

Liu és szerzőtársai a háromtengelyes szerszámgépen végzett spirális marás kinematikáját elemezték (Liu et al., 2012). A forgácsolóerő modellt azért hozták létre, hogy pontosan előre jelezzék a spirális marási művelet során fellépő forgácsolóerőket és nyomatókot a csavarvonalú előtolás, az orsósebesség, az axiális és radiális fogásmélység és a marószerszám geometriája függvényében. Mind a paláston, mind a homlokfelületen lévő forgácsolóéleken a spirális előtolási pálya mentén fellépő forgácsolóerőket a szerszám tangenciális és axiális mozgásának figyelembevételével modellezték. A forgácsolóerő modell mind a paláston, mind a homlokfelületen lévő forgácsolóéleken fellépő forgácsolóerő előrejelzésére

használható. A kísérleti eredmények igazolták, hogy a szimuláció eredménye hatékonyan és pontosan előrejelzi a forgácsolóerőket.

Palanisamy és szerzőtársai a homlokmarás dinamikai forgácsolóerő modelljét fejlesztették ki a tangenciális forgácsolóerő és az előtolóerő előrejelzésére (Palanisamy et al., 2006). A modell számítási eredményét az AISI 1020 acél háromtengelyes marószerszám-dinamométerrel végzett megmunkálása során fellépő kísérleti forgácsolóerőkkel igazolták. A szerszám-forgács határfelületi hőmérsékletét a különböző megmunkálási feltételekhez az Oxley-féle energiamegosztási függvény és a Rapier-egyenlet segítségével határozták meg a forgácsolóerőre gyakorolt hőhatás vizsgálatára.

Özel és Altan egy módszertant dolgoztak ki a forgácsolási folyamat szimulálására síkmarási műveletben, valamint a forgácsáramlás, a forgácsolóerők, a szerszámfeszültségek és a hőmérsékletek meghatározásához végeselemes elemzés segítségével (Özel és Altan, 2000). DEFORM-2D szoftver segítségével a munkadarab anyagára vonatkozó, korábban kifejlesztett áramlási feszültség adatokat és a forgácsszerszám érintkezési súrlódást használták fel nagy alakváltozási sebességeknél és hőmérsékleteknél. A deformálatlan forgácsgeometria moduláris ábrázolását sík alakváltozási és tengelyszimmetrikus munkadarab deformációs modellek felhasználásával alkalmazták a forgácsképződés előrejelzésére a síkmaró fő- és mellékforgácsolóelein. A horonymarás száraz megmunkálási kísérleteit egy lapkás, egyenes vágóélű sík szármarókkal végezték. A becsült forgácsolóerők és a mért erők összehasonlítása ésszerű egyezést mutatott, és azt jelzi, hogy a szerszámfeszültségek és hőmérsékletek is elfogadható pontossággal előre jelezhetők.

Takeuchi és Sakamoto a megmunkálási hibákat értékelték a homlokmarásnál (Takeuchi és Sakamoto, 1982). Az elemzés során figyelembe vették, hogy a szerszám gép forgácsolóerőből adódó deformációja és a szerszám hőtágulása okoz főként megmunkálási hibákat. A szerszám gép szerkezetére és forgácsolási állapotára vonatkozó adatokból a megmunkálási hibák előrejelzett értékei kvantitatívan megfelelnek a forgácsolási kísérletekben mért értékeknek. Megállapították, hogy a szerszám gép szerkezetének forgácsolóerő általi deformációja miatt a marótengely ferdesége, a fogásmélység változása és a szerszám hőtágulása miatt lépcsőket formál a szomszédos felületelemek között.

Pimenov és szerzőtársai egy módszert javasoltak a megmunkáló rendszer teljes rugalmas alakváltozásainak becslésére homlokmarás során, figyelembe véve a szerszám hátkopását és a megmunkálási folyamat paramétereit (Pimenov et al., 2017). Az axiális és szögdeformációkat kombináló teljes rugalmas elmozdulást vizsgálva megállapították, hogy azt befolyásolják a homlokmarás megmunkálási paramétereit (munkadarab anyaga, forgácsoló sebesség, fogásmélység, főélelhelyezési szög, a maró kinyúlásának és átmérőjének aránya, fogankénti előtolás) és a szerszám hátkopásának különböző értékei a megmunkálás során. A homlokmaró fogak hátkopásának növekedése a technológiai rendszer rugalmas deformációinak jelentős növekedéséhez vezetett.

Pálmai és szerzőtársai a marásban feltételezett tranzienst folyamatokat vizsgálták (Pálmai et al., 2019). Egy olyan modellt fejlesztettek ki, amely valósághűen írja le a megszakított forgácsolásban a forgácsolóerőt. A kiindulási hipotézis szerint a forgácsolóerő véges idő alatt ér el stacionárius állapotot, mivel a deformációs termodinamikai folyamatok időigényesek. A feltételezett tranzienst folyamat kvantitatív leírásában olyan modellfüggvényt alkalmaztak, ahol a szokásos Kienzle-összefüggést egy exponenciális résszel egészítették ki. Az erőmérések normalizált C45 acél marása során történtek. Egyértelműen bebizonyosodott, hogy a feltételezett tranzienst jelenség létezik, és megközelítőleg leírható egy exponenciális függvényvel, amely a folyamat sebességét τ időállandóval mutatja. A modellfüggvény jól illeszkedik a mért forgácsolóerőkhöz és az erők alapján meghatározott fajlagos forgácsolóerőkhöz.

Kundrák és szerzőtársai a marás energetikai jellemzőit vizsgálták, különös tekintettel a leválasztott keresztmetszet alakjára (Kundrák et al., 2021a). Az energetikai elemzést a Third Wave AdvantEdge

FEM szoftverrel végezték, a marás szimulációs módszerét pedig forgácsolóerő mérésekkel validálták. Megállapították, hogy energetikai szempontból az alkalmazott technológiában célszerű elkerülni az $a_p/f_z=1$ forgácsarányt. Ha van rá lehetőség, törekedni kell az a_p/f_z forgácsarány értékét minél kisebbre megválasztani. Egy másik cikkükben (Kundrák et al., 2021b) összefoglalták a forgácsolóerő és a forgácsolási hőmérséklet vizsgálatának néhány eredményét. A homlokmarás technológiai elemzését FEM szimulációval végezték, amelyet a forgácsolóerő mérésével hasonlítottak össze és validáltak. Megállapítást nyert, hogy forgószerszámok esetében a névleges rétegvastagság, az ekvivalens rétegvastagság és a forgácsarány a maró ϕ szögelfordulása mellett az anyagleválasztást, így a forgácsolóerőt és a forgácstó hőmérsékletét jól jellemzi.

5. Összefoglalás

A homlokmarás kutatása során több kutató is kiemelkedő munkát végzett, biztosítva a tudományterület folyamatos fejlődését, a szakmai ismeretek bővülését. A cikksorozat 1. része összefoglalja a forgácsolóerő meghatározásához és előrejelzéséhez kötődő, a nemzetközi és a hazai szakirodalomban a homlokmarás területén megjelent főbb kutatási eredményeket.

Irodalom

- [1] Kundrák, J., Markopoulos, A. P., Makkai, T., Nagy, A. (2018a). Theoretical and experimental analysis of the effect of chip size ratio on cutting forces in face milling of steel. *International Journal of Mechanical Engineering*, 3, 29–35.
<https://doi.org/10.21062/ujep/117.2018/a/1213-2489/MT/18/3/431>
- [2] Andersson, C., Andersson, M., Ståhl, J.-E. (2011). Experimental studies of cutting force variation in face milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 51(1), 67–76.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2010.09.004>
- [3] Tomíček, J., Molotovnik, A. (2016). Influence of cutting conditions on profile milling of INCONEL 738LC alloy. *Manufacturing Technology*, 16(2), 461–467.
<https://doi.org/10.21062/ujep/x.2016/a/1213-2489/MT/16/2/461>
- [4] Kundrák, J., Gyáni, K., Felhő, C., Deszpoth, I. (2017a). The effect of the shape of chip cross section on cutting force and roughness when increasing feed in face milling. *Manufacturing Technology*, 17(3), 335–342. <https://doi.org/10.21062/ujep/x.2017/a/1213-2489/MT/17/3/335>
- [5] Habrat, W., Motyka, M., Topolski, K., Sieniawski, J. (2016). Evaluation of the cutting force components and the surface roughness in the milling process of micro- and nanocrystalline titanium. *Archives of Metallurgy and Materials*, 61(3), 1033–1038.
<http://doi.org/10.1515/amm-2016-0226>
- [6] 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*, 28(1), 308–312. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2005.06.002>
- [7] Zheng, H. Q., Li, X. P., Wong, Y. S., Nee, A. Y. C. (1999). Theoretical modelling and simulation of cutting forces in face milling with cutter runout. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 39(12), 2003–2018. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(99\)00023-1](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(99)00023-1)
- [8] 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*, 2(4), 225–240.
[https://doi.org/10.1016/S1526-6125\(00\)70024-7](https://doi.org/10.1016/S1526-6125(00)70024-7)

- [9] Subramanian, M., Sakthivel, M., Sooryaprakash, K., Sudhakaran, R. (2013). Optimization of cutting parameters for cutting force in shoulder milling of Al7075-T6 using response surface methodology and genetic algorithm. *Procedia Engineering*, 64, 690–700. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.09.144>
- [10] Čekić, A., Begić-Hajdarević, Đ. & Kulenović, M. (2013). Effect of the cutting parameters on cutting forces in high speed face milling. *Tehnicki Vjesnik*, 20(5), 775–780.
- [11] Chuangwen, X., Jianming, D., Yuzhen, C., Huaiyuan, L., Zhicheng, S., Jing, X. (2018). The relationships between cutting parameters, tool wear, cutting force and vibration. *Advances in Mechanical Engineering*, 10(1), 1–14. <https://doi.org/10.1177/1687814017750434>
- [12] Pathak, B., Sahoo, K. L., Mishra, M. (2013). Effect of machining parameters on cutting forces and surface roughness in Al-(1-2)Fe-1V-1Si alloys. *Materials and Manufacturing Processes*, 28(4), 463–469. <https://doi.org/10.1080/10426914.2013.763952>
- [13] Subramanian, A. V. M., Nachimuthu, M. D. G., Cinnasamy, V. (2017). Assessment of cutting force and surface roughness in LM6/SiCp using response surface methodology. *Journal of Applied Research and Technology*, 15(3), 283–296. <https://doi.org/10.1016/j.jart.2017.01.013>
- [14] Kilickap, E., Ahmet, Y., Çelik, Y. H. (2017). Mathematical modelling and optimization of cutting force, tool wear and surface roughness by using artificial neural network and response surface methodology in milling of Ti-6242S. *Applied Sciences*, 7(10), 1064. <https://doi.org/10.3390/app7101064>
- [15] Malghan, R. L., Rao, M. C. K., ArunKumar, S., Rao, S. S., D'Souza, R. J. (2018). Effect of process parameters in face milling operation and analysis of cutting force using indirect method. *Materials and Manufacturing Processes*, 33(13), 1406–1414. <https://doi.org/10.1080/10426914.2017.1388520>
- [16] Sztankovics, I., Kundrák, J. (2017). Chip removal characteristics with constant chip cross-sectional area and different a_p/f_z ratios in face milling. *Cutting & Tools in Technological Systems*, 87, 155–163.
- [17] Kundrák, J., Makkai, T., Deszpoth, I. (2017b). Effect of cutting feed and chip size ratio on cutting force. *Solid State Phenomena*, 261, 3–8. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.261.3>
- [18] Kundrák, J., Markopoulos, A. P., Makkai, T., Deszpoth, I., Nagy, A. (2018b). Analysis of the effect of feed on chip size ratio and cutting forces in face milling for various cutting speeds. *Manufacturing Technology*, 18(3), 431–438. <https://doi.org/10.21062/ujep/117.2018/a/1213-2489/MT/18/3/431>
- [19] Kundrák, J., Markopoulos, A. P., Makkai, T., Nagy, A. (2018c). Correlation between chip ratio and specific forces with increasing feed per tooth and cutting speed in face milling of steel. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, 14, 338–346.
- [20] Karkalos, N. E., Markopoulos, A. P., Makkai, T., Kundrák, J. (2019a). Influence of depth of cut and cutting speed on cutting forces in face milling under constant chip cross-section conditions. *Cutting & Tools in Technological Systems*, 90, 9–14. <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2019.90.02>
- [21] Karkalos, N. E., Markopoulos, A. P., Makkai, T., Kundrák, J. (2019b). 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 Systems*, 90, 3–8. <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2019.90.01>

- [22] Kundrák, J., Markopoulos, A. P., Karkalos, N. E., Makkai, T. (2019a). The examination of cutting force as function of depth of cut in cases with constant and changing chip cross section. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 4, 405–415. https://doi.org/10.1007/978-3-030-16943-5_35
- [23] Makkai, T. (2020a). A forgácsolóerő vizsgálata korrózióálló acél homlokmarásánál. *Multidiszciplináris tudományok*, 10(1), 77–87. <https://doi.org/10.35925/j.multi.2020.1.10>
- [24] Kundrák, J., Markopoulos, A. P., Karkalos, N. E., Makkai, T. (2020). The effect of cutting speed and feed on cutting forces in face milling with square shaped insert. In Gençyılmaz, M. G., Durakbasa, N. M. (Eds.), *Proceedings of the International Symposium for Production Research 2019* (pp. 192–200). Bécs, Ausztria, Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-31343-2_17
- [25] Makkai, T., Kundrák, J., Karkalos, N. E., Markopoulos, A. P. (2019). Face milling with a round insert at various cutting speeds and feed rates. *Cutting & Tools in Technological Systems*, 91, 125–133. <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2019.91.12>
- [26] Makkai, T. (2022). Face milling of steel with octagonal insert. *Cutting & Tools in Technological Systems*, 97, 145–154. <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2022.97.13>
- [27] Makkai, T. (2020b). A forgácsolóerő vizsgálata nyolcszögletű lapkával végzett homlokmarásánál. *Multidiszciplináris tudományok*, 10(3), 285–293. <https://doi.org/10.35925/j.multi.2020.3.34>
- [28] Kundrák, J., Markopoulos, A. P., Makkai, T., Karkalos, N. E. (2019b). Effect of edge geometry on cutting forces in face milling with different feed rates. *Manufacturing Technology*, 19(6), 984–992. <https://doi.org/10.21062/ujep/407.2019/a/1213-2489/MT/19/6/984>
- [29] Makkai, T. (2020c). Oktagonális lapka alkalmazása során mért forgácsolóerő vizsgálata és összehasonlítása más lapka geometriákkal homlokmarás esetén. *Multidiszciplináris tudományok*, 10(4), 292–301. <https://doi.org/10.35925/j.multi.2020.4.33>
- [30] Karpuschewski, B., Kundrák, J., Emmer, T., Borysenko, D. (2017). A new strategy in face milling - inverse cutting technology. *Solid State Phenomena*, 261, 331–338. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.261.331>
- [31] Borysenko, D., Karpuschewski, B., Welzel, F., Kundrak, J., Felhő, C. (2019). Influence of cutting ratio and tool macro geometry on process characteristics and workpiece conditions in face milling. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 24, 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2018.12.003>
- [32] Felhő, C., Rakonczai, E. (2019). FEM investigation of cutting force components in high-feed face milling. *Cutting & Tools in Technological Systems*, 91, 191–199. <http://doi.org/10.20998/2078-7405.2019.91.18>
- [33] Felhő, C. (2020). Finite element modelling of cutting force components in face milling. *Multidiszciplináris tudományok*, 10(1), 119–128. <https://doi.org/10.35925/j.multi.2020.1.15>
- [34] Akkad, M. Z., Felhő, C. (2019). Simulating the effect of depth of cut and feed rate on the force components in face milling. *Multidiszciplináris tudományok*, 9(1), 65–72. <https://doi.org/10.35925/j.multi.2019.1.9>
- [35] Chang, C.-S. (2005). Prediction of cutting forces in milling stainless steels using chamfered main cutting edge tool. *Journal of Mechanics*, 21(3), 145–155. <https://doi.org/10.1017/S1727719100000587>
- [36] Ghorbani, H., Moetakef-Imani, B. (2016). Specific cutting force and cutting condition interaction modeling for round insert face milling operation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 84, 1705–1715. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7985-2>

- [37] Nguyen, N.-T. (2021). A development method of cutting force coefficients in face milling process using parallelogram insert. *EUREKA: Physics and Engineering*, 5, 36–52. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2021.001890>
- [38] Ma, J.-w., Jia, Z.-y., Wang, F.-j., Gao Y.-y., Liu Z. (2016). A new cutting force modeling method in high-speed milling of curved surface with difficult-to-machine material. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 84(9–12), 2195–2205. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7856-x>
- [39] Biró, I., Szalay, T. (2017). Extension of empirical specific cutting force model for the process of fine chip-removing milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88(9-12), 2735–2743. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8957-x>
- [40] Biró, I., Czampa, M., Szalay, T. (2015). Experimental model for the main cutting force in face milling of a high strength structural steel. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 59(1), 16–22. <https://doi.org/10.3311/PPme.7516>
- [41] Zhang, T., Liu, Z., Sun, X., Xu, J., Dong, L., Zhua, G. (2019). Investigation on specific milling energy and energy efficiency in high-speed milling based on energy flow theory. *Energy*, 192, 116596. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116596>
- [42] Rubeo, M. A., Schmitz, T. L. (2016). Milling force modeling: a comparison of two approaches. *Procedia Manufacturing*, 5, 90–105. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.08.010>
- [43] Pratap, T., Patra, K., Dyakonov, A. A. (2015). Modeling cutting force in micro-milling of Ti-6Al-4V titanium alloy. *Procedia Engineering*, 129, 134–139. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.021>
- [44] Liu, C., Wang, G., Dargusch, M. S. (2012). Modelling, simulation and experimental investigation of cutting forces during helical milling operations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 63, 839–850. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-3951-4>
- [45] Palanisamy, P., Rajendran, I., Shanmugasundaram, S., Saravanan, R. (2006). Prediction of cutting force and temperature rise in the end-milling operation. *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 220(10), 1577–1587. <https://doi.org/10.1243/09544054JEM542>
- [46] Özel, T., Altan, T. (2000). Process simulation using finite element method - prediction of cutting forces, tool stresses and temperatures in high-speed flat end milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40(5), 713–738. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(99\)00080-2](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(99)00080-2)
- [47] Takeuchi, Y., Sakamoto, M. (1982). Analysis of machining error in face milling. In: Davies, B.J. (Eds.), *Proceedings of the Twenty-second International Machine Tool Design and Research Conference* (pp. 153-158). Palgrave, London. https://doi.org/10.1007/978-1-349-06281-2_20
- [48] Pimenov, D. Y., Guzeev, V. I., Mikolajczyk, T., Patra, K. (2017). A study of the influence of processing parameters and tool wear on elastic displacements of the technological system under face milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92(9–12), 4473–4486. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0516-6>
- [49] Pálmai, Z., Kundraák, J., Makkai, T. (2019). The transient changing of forces in interrupted milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104(9–12), 3787–3801. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04079-1>
- [50] Kundraák, J., Karpuschewski, B., Pálmai, Z., Felhő, C., Makkai, T., Borysenko, D. (2021a). The energetic characteristics of milling with changing cross-section in the definition of specific cutting

- force by FEM method. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 21(2), 214–222. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.11.006>
- [51] Kunderák, J., Pálmai, Z., Karpuschewski, B., Felhő, C., Makkai, T., Borysenko, D. (2021b). Force and temperature conditions of face milling with varying chip quotient as a function of angle of rotation. *Manufacturing Technology*, 32, 61–69. <https://doi.org/10.21062/mft.2021.033>