

A HOMLOKMARÁS KUTATÁSÁNAK FŐBB EREDMÉNYEI 3. RÉSZ: A HATÉKONYSÁG, A STABILITÁS ÉS A SORJAKÉPZŐDÉS VIZSGÁLATA, HŰTÉS-KENÉS, KONSTRUKCIÓS FEJLESZTÉSEK

Makkai Tamás 

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

Absztrakt

A cikksorozat 3. része bemutatja a hazai és a nemzetközi szakirodalomban megtalálható kutatási eredményeket, amelyek a homlokmarás területén jelentek meg az alábbi témakörökben: a megmunkálás hatékonyságának vizsgálata, a megmunkálási folyamat stabilitásának és a keletkező rezgéseknek a vizsgálata, a sorjaképződés mechanizmusa és a sorja csökkentésének lehetőségei, a hűtő-kenő anyagok alkalmazásának vizsgálata, a homlokmarási folyamat és a marószerszám konstrukciós fejlesztése.

Kulcsszavak: homlokmarás, szakirodalmi összefoglalás, hatékonyság, stabilitás, rezgés, sorjaképződés, hűtés-kenés, folyamat fejlesztés, szerszám konstrukció fejlesztése

Abstract

Part 3 of the series of papers presents the research results found in the Hungarian and international literature, which were published in the field of face milling in the following topics: examination of the efficiency of machining, examination of the stability of the machining process and vibrations, the mechanism of burr formation and the burr reduction possibilities, examination of the application of cooling and lubricating materials, development of the face milling process and the milling tool construction.

Keywords: face milling, literature review, efficiency, stability, vibration, burr formation, cooling and lubrication, process development, tool construction development

1. Bevezetés

A síkfelületek forgácsoló megmunkáló eljárásai között nagy jelentőséggel bír a homlokmarás. Nagy termelékenység jellemzi, annak további növelése célként kitűzve folyamatosan jelen van a termelési folyamatokban. Több kutatás foglalkozott már a termelékenység növelésének műszaki lehetőségeivel, feltárták a homlokmarás egyes technológiai paramétereivel való összefüggéseit. Mások a marási folyamat stabilitását vizsgálták. A fellépő rezgések a zajhatás mellett a megmunkált felület szempontjából is káros hatással lehetnek. A munkadarab sorjamentessége általános követelmény, mind a termék elvárt működése, mind a balesetvédelem szempontjából. A sorjaképződés mechanizmusának a feltárása elősegíti a sorja elkerülését, csökkentését célul kitűző kutatásokat. Vizsgálták a hűtő-kenőanyagok alkalmazásának hatását is, elemezték a marás technológiai paramétereivel, egyéb mechanikai jellemzőkkel való kapcsolatát. Környezetvédelmi szempontból a száraz, vagy a minimálkenésű megmunkálás alkalmazása előnyös, vizsgálatok tárgyát képezte a kriogén hűtési technika is. A marási folyamat javításának fő eleme a marószerszám konstrukciójának a fejlesztése. Vizsgálták a szerszámanyagok és bevonatok

hatását, elemezték a különböző élgeometriából adódó hatásokat a terhelésre vonatkozóan és a megmunkált felület struktúrája szempontjából. A cikk összefoglalja a homlokmarás kutatásának itt felsorolt területein megjelent szakirodalmi eredményeket.

2. A homlokmarás hatékonyságának vizsgálata

Budak és Tekeli bemutatták, hogy a rezgésmentesség biztosítása mellett az anyagleválasztási sebesség maximalizálása érdekében a radiális fogásmélység fontos tényező (Budak és Tekeli, 2005). Javasoltak egy módszert a fogásmélységek optimális kombinációjának meghatározására, hogy maximális anyagleválasztási sebesség adódjon rezgésmentesen. A módszer alkalmazását egy példán mutatták be, ahol az optimális fogásmélységek használatával jelentős megmunkálási idő csökkenést értek el. Az eljárás könnyen integrálható CAD/CAM rendszerbe vagy virtuális megmunkálási környezetbe az optimális marási feltételek feltárása érdekében.

A megmunkálási idő pontos becslése nagyon fontos a szállítási idő és a gyártási költségek előrejelzésében, valamint a gyártási folyamat tervezésében. A legtöbb kereskedelmi forgalomban lévő CAM szoftverrendszer úgy becsüli meg a megmunkálási időt a marási műveleteknél, hogy a teljes szerszámút hosszát elosztja a programozott előtolással. Ez az időbecslés drasztikusan eltér a valós folyamatidőtől, mivel az előtolás nem mindig állandó a gépi és számítógépes számjegyvezérlési (CNC) korlátozások miatt. Coelho és szerzőtársai egy gyakorlati módszert mutattak be a marási idő becslésére szabad formájú geometriák megmunkálásakor (Coelho et al., 2010). A módszer figyelembe veszi a gépi válaszidőnek (MRT) nevezett változót, amely a valódi CNC gép azon képességét jellemzi, hogy szabad formájú geometriákban nagy előtolási sebességgel mozogjon. Az MRT egy globális teljesítményjellemző, amely egy egyszerű teszttel minden típusú CNC gépnél meghatározható. A módszertan validálásához egy munkadarabra NC programokat generáltak öt különböző típusú CNC géphez. Az eredmények azt mutatták, hogy az MRT, és ebből következően a valós megmunkálási idő a CNC gép potenciáljától függ: minél nagyobb az MRT, annál nagyobb a különbség a várható marási idő és a valós marási idő között.

Vila és szerzőtársai technológiai és gazdasági megfontolásokkal foglalkoztak, amelyek lényegesek a homlokmarás és a köszörülés műveleteinek meghatározásához az edzett acél síkfelületek gyártásánál (Vila et al., 2012). Köszörülési és a homlokmarási kísérleteket végeztek edzett szerszámacélon alumínium-oxid köszörűkoronggal és bevont volfrám-karbid marószerszámmal. Összehasonlították a homlokmarás és a köszörülés technológiai tulajdonságait és gazdaságosságát. Megállapították, hogy a homlokmarás fazettás, bevontos volfrám-karbid szerszámokkal versenyképes folyamat a köszörüléssel összehasonlítva, a termék minőségét és a megmunkálás gazdaságosságát tekintve.

Parashar és Purohit az anyagleválasztási sebesség optimalizálását javasolták Taguchi dinamikus kísérlettervezésének módszerével marási műveletekhez (Parashar és Purohit, 2017). Minden kísérletet különböző forgácsolási körülmények között végeztek, a forgácsoló sebesség, az előtolás és a fogásmélység változtatásával. EN 19 acélminőséget munkáltak meg egy TiN bevontú keményfém marószerszámmal függőleges tengelyű marógépen. Megállapították, hogy az anyagleválasztási sebességet jelentősen befolyásoló fő tényezők a fogásmélység és az előtolás, növelésükkel az anyagleválasztási sebesség is nő. Az eredmények azt mutatták, hogy a Taguchi tervezés hatékony eszköz a folyamat optimalizálásához.

Kundrák és szerzőtársai a homlokmarással végzett anyagleválasztás hatékonyságát elemezték alumíniumötvezetek gyémánt szerszámokkal való megmunkálásánál (Kundrák et al., 2018a; Kundrák et al., 2018b). Azt vizsgálták, hogy a termelékenységet hogyan lehet növelni olyan technológiai adatok kivá-

lasztásával, amelyek csökkentik az eljárás megmunkálási idejét, vagy növelik az anyagleválasztási sebesség, illetve a felületképzési sebesség értékét. Az elemzéshez prizmatikus alkatrészek megmunkálásával forgácsolási kísérleteket végeztek üzemi körülmények között. Megállapították, hogy az MKGS-rendszer (munkadarab-készülék-gép-szerszám rendszer) teljesítményhatárain belül a gyártási idő jelentős csökkenése és ezáltal költségmegtakarítás érhető el megfelelően kiválasztott forgácsolási adatokkal, a legyártott alkatrészek geometriai pontossága és felületi minősége az alkatrészarajz előírásainak is eleget tett.

Kundrák és szerzőtársai az anyagleválasztás intenzitásának növelési lehetőségeit elemezték egy alumíniumötvözet homlokmarásánál (Kundrák et al., 2019a; Kundrák et al., 2019b; Kundrák et al., 2019c). A termelékenység jellemzésére különféle időparaméterek és az egységnyi idő alatt leválasztott anyag-térfogat alkalmazhatók. A vizsgálat ezen paraméterek elemzésére irányult a hajtóműház felületeinek megmunkálása során, amikor egyes technológiai paraméter értékek (előtolás, forgácsoló sebesség, marófej átmérő) változtak. A három paraméter értékeinek külön-külön való és párhuzamos növelése a hatékonysági érték növekedését eredményezte. Valamennyi választott technológiai értékkel növelhető volt az anyagleválasztás hatékonysága és minden esetben teljesültek a megadott felületi érdesség és geometriai pontosság értékek.

Shinge és Dabade mikromarási eljárást vizsgáltak 6063 T6 alumíniumötvözetnél csatornák keményfém mikromaróval történő megmunkálásánál száraz körülmények között (Shinge és Dabade, 2018). Vizsgálták a folyamatparaméterek, például az orsó fordulatszáma, az előtolás és a fogásmélység hatását az anyagleválasztási sebességére és a csatorna szélességének méretváltozására. A kísérlet tervezését Taguchi módszerrel végezték, a kísérleti eredményeket ANOVA-val elemezték (ANOVA = analysis of variance, varianciaelemzés).

Gurdal és szerzőtársai a négyzet alakú, a kör alakú és a nagy előtolású lapkák anyagleválasztási teljesítményét vizsgálták, amelyek mindegyike különböző főlelhelyezési szögekkel rendelkezik (Gurdal et al., 2018). A kísérleteket egy acélötvözet hűtőfolyadék nélkül végzett nagyoló homlokmarásával végezték el. A kör alakú és a nagy előtolású lapkákhöz prediktív szerszámélettartam modelleket dolgoztak ki a válaszfelületi módszertan segítségével, megfelelőségüket varianciaanalízissel ellenőrizték. A kísérleti adatok azt mutatták, hogy a nagyoló marásoknál, ahol a durvább felületminőség megengedett, a kis főlelhelyezési szögű lapkák használata jelentősen javíthatja a termelékenységet, lerövidítheti a fogásonkénti forgácsolási időt. A kisebb főlelhelyezési szögek szintén segítenek a forgácsolóerők elosztásában a szerszámtengely felé, ami előnyös a rezgések elkerülése érdekében.

3. A marási folyamat stabilitása, a keletkező rezgések vizsgálata

Insperger és szerzőtársai a marási folyamat dinamikus stabilitását egyetlen szabadságfokú mechanikai modellen keresztül vizsgálták (Insperger et al., 2003). Két alternatív analitikai módszert mutattak be, mindkettő a szabályozott idejű periodikus késleltetés-differenciál egyenlet véges dimenziós diszkrét térképi ábrázolásán alapul. A stabilitási térképeket és az öngerjesztő rezgés frekvenciákat a részleges ellenes egyenirányú maráshoz, valamint a teljes fogásszélességű marási műveletekhez határozták meg.

Mann és szerzőtársai kísérletileg vizsgálták a megszakított forgácsolás stabilitását egyetlen szabadságfokú marási eljárásban (Mann et al., 2003). A rendszer elmozdulását folyamatosan és periodikusan mintavételezték szerszám fordulatonként egyszer. Ezeket az adatmintákat használták fel a rendszer stabilitásának értékelésére. Az eredmények megerősítették az 1. részben (Insperger et al., 2003) kapott

elméleti előrejelzéseket. A kísérletek azt is megmutatták, hogy ugyanazon paraméterkombinációk (fogásmélység és orsó fordulatszám) esetén eltérő stabilitási viselkedés léphet fel ellen- és egyenirányú marásnál.

Insperger és szerzőtársai a marás két szabadságfokú modelljét vizsgálták (Insperger et al., 2006). Megmutatták, hogy a felületi helyzethiba nagy az orsó azon fordulatszámainál, ahol a szerszám domináns frekvenciájának és a marófog áthaladási frekvenciájának az aránya egész szám. Ezt a jelenséget a szerszám periodikus rezgésmentes mozgásának nagy amplitúdójával magyarázták ezeknél a rezonáns fordulatszámoknál. Bemutatták, hogy nagy stabil fogásmélységek kis felületi helyzethibával még mindig elérhetők a rezonáns orsó fordulatszám közelében, a stabilitási diagramokhoz kapcsolódó felületi helyzethiba diagramok használatával. Az eredményeket kísérletekkel is megerősítették egy nagysebességű maróközponton.

A frekvencia spektrumok megfigyelése általában hatékony módszer a rezgés észlelésére, mivel ezeknek a spektrumoknak jellemzően világos és szisztematikus szerkezetük van. A forgácsolási folyamat stabilitását nem mindig lehet csak a frekvencia spektrumok megtekintésével meghatározni. A szerszám ütésének zavaró hatása néha megakadályozhatja a stabilitás megfelelő meghatározását. Insperger és szerzőtársai ezt a jelenséget vizsgálták (Insperger et al., 2008). A Floquet-elmélet a periodikus rendszereknél felhasználható az ütésnek a marási rezgési frekvenciák szerkezetére gyakorolt hatásának feltárására. Az elméleti elemzés eredményeit forgácsolási kísérletekkel is alátámasztották.

Karpuschewski és Batt a homlokmarási műveletekben használt forgácsolási technikákkal foglalkoztak, félig stabil és instabil körülmények között (Karpuschewski és Batt, 2007). A rezgő szerszámoknak és munkadaraboknak közvetlen következményei vannak, amelyek befolyásolják a felületek érdességét és hullámosságát, valamint kopást okoznak. A nagy hatékonyságú forgácsolási paraméterek nem használhatók, a normál forgácsolási paraméterek mellett történő marás bizonyos speciális körülmények között rezgést okozhat, ami károsíthatja a szerszámot és a munkadarabot. Az integrált fogásmegosztással ellátott marószerszámok használatára vonatkozó stratégia azt mutatja, hogy a kisebb b/h forgácsarány alkalmazásával a folyamat rezgési jellemzői jelentősen javíthatók, ezáltal növelve a marási folyamat teljesítményét.

Antoniali és szerzőtársai a szerszám belépési szögének hatását tanulmányozták titánötvözet marásánál a folyamat stabilitására és a szerszám élettartamára a forgácsolóerők idő- és frekvenciatartomány elemzése alapján (Antoniali et al., 2010). Az eredmények azt mutatták, hogy a kisebb belépési szögek stabilabb forgácsolást eredményezhetnek, amit a szerszám rendszeres kopása okoz. Bár a forgácsoló erők nagyobbak a kisebb belépési szögeknél, a szerszám élettartama sokkal hosszabb, mivel a terhelés nagy része alacsony frekvenciákkal jár, amelyeknél a szerszám merev testként viselkedik.

Quintana és Ciurana áttekintették a rezgési problémával kapcsolatos kutatások állását és osztályozták a stabil forgácsolás biztosítására kifejlesztett meglévő módszereket (Quintana és Ciurana, 2011). A megmunkálás rezgései az MKGS-rendszer egyes alkotóelemeinek dinamikus merevségének hiányából fakadnak. Ha a rendszer jól kiegyensúlyozott, akkor is keletkezhet rezgés a forgács vastagságának változása és a folyamat megszakított jellege miatt.

Ji és szerzőtársai kidolgoztak egy módszert az aerodinamikai zajkeltés és forgó homlokmaró által történő zajterjedés kiszámítására (Ji et al., 2014). Elemezték a marógép geometriájának az aerodinamikai zaj keletkezésére gyakorolt hatását. Megállapítást nyert, hogy mind a teljes szerszám miatti aerodinamikai zajt, mind a csak a szerszámnyílások által okozott aerodinamikai zajt jelentősen befolyásolja a marófogak/nyílások száma. A csak a szerszámnyílások által keltett aerodinamikai zaj erősen függ a nyílások kialakításától és térfogatától.

Az öngerjesztő rezgés az egyik fő korlátja a forgácsolási folyamatoknak. A rezgés tönkre teheti az alkatrész felületét és jelentősen csökkentheti a szerszám gép különböző alkotóelemeinek élettartamát, beleértve magát a szerszámot is. Munoa és szerzőtársai kritikai áttekintést nyújtottak a különböző rezgéscsökkentési technikákról (Munoa et al., 2016). Tervezési és vezérlési megközelítésű folyamatmegoldásokat állítottak össze, hogy bemutassák a forgácsolási folyamat stabilizálására rendelkezésre álló módszereket.

Svinin és Nikulin áttekintést adtak a lépcsős szármáró használatáról nagy ráhagyások nagyoló forgácsolásánál és síkfelületek simító forgácsolásánál, ahol biztosították a forgácsolóerők csökkentését, a dinamikus stabilitás és a teljesítmény növelését (Svinin és Nikulin, 2019). Az orsó és a munkadarab alrendszer, valamint az orsó torziós alrendszer hosszirányú előtolás irányában bekövetkező rezgéseinek vizsgálata szimulációs modellezési módszerrel történt. Részletes képeket kaptak ezen alrendszerek rezgéseiről. Ezen rezgések alapos elemzése a rezgések regenerációs elméletének alapelvei alapján lehetővé tette azok természetének és kölcsönös hatásának megállapítását.

4. A sorjaképződés elemzése

Chern a sorjaképződés mechanizmusát tanulmányozta homlokmarás során, megvizsgálta a forgácsolási körülmények hatását a sorjaképződésre az alumíniumötvözetek homlokmarásánál (Chern, 2006). Megállapította, hogy a síkbeli kilépési szög erősen befolyásolja a sorja geometriáját a homlokmarásnál. A homlokmarás megmunkálási irányelve az, hogy 150° -nál nagyobb síkbeli kilépési szög és a kritikusnál nagyobb fogásmélység legyen beállítva, hogy hatékonyan csökkenjen a sorjaképződés lehetősége. Nagyobb előtolási sebesség választásával megkönnyíthető a másodlagos sorja kialakulása, feltéve, hogy élszakadás nem következik be, és a felületminőség is elfogadható marad.

Mátyási és Rakita ötszintű integrációt alkalmaztak a sorjaképződés minimalizálása érdekében (Mátyási és Rakita, 2012). A homlokmarási művelet során a sorja méretének csökkentésére geometriai megközelítéseket fejlesztettek ki, hogy elkerüljék a szerszám kilépésénél a kritikus kilépési szöget. Meghatározható egy optimális szerszámút a sorja minimalizálásához. A modell és az algoritmus finomításához meghatározták a fogásmélység és az előtolás hatását a sorja méretére és a sorjaképződésre homlokmarásnál. Annak ellenére, hogy a munkadarab nagyon lágy anyaga miatt a sorjaképződési hajlam nagy volt, mégis azt tapasztalták a kísérletek során, hogy az élek tiszták és sorjamentesek lettek.

Da Silva és szerzőtársai rozsdamentes acél homlokmarását vizsgálták bevonatos keményfém lapkával szerelt szerszámot alkalmazva (da Silva et al., 2014). Az elemzés arra irányult, hogy a hűtési technika (elárasztásos, lassú áramlású, minimális, száraz), a forgácsoló szerszám geometriája és a radiális fogásmélység milyen hatással van a sorja magasságára. Megmérték a munkadarab szélénél a kilépő sorja magasságát. Megállapították, hogy a sorja magasságát nem befolyásolta az alkalmazott hűtési technika, a marószerszám geometriája azonban fontos tényező volt a sorja képződésnél. A sugárirányú fogásmélység szintén fontos tényezőnek bizonyult, a nagyobb sugárirányú fogásmélység nagyobb méretű sorját eredményezett.

Póka és szerzőtársai a sorja csökkentésének lehetőségeit tanulmányozták (Póka et al., 2016). A bemutatott módszer segítségével a szerszám pálya bármely kilépési szögre előállítható egy vonalából és ívekből álló munkadarab kontúrhoz. A minimális sorjamérethez tartozó kilépési szög beállításával ezzel a technikával a sorja mérete hatékonyan csökkenthető. A kilépési szög optimális tartományának meghatározásával a szerszámút tovább finomítható, így a töréspontok és szakadások kiküszöbölhetők, a szerszámút lerövidíthető. Bemutatták a kísérletek eredményeit, amelyek szemléltetik a módszer hatékonyságát.

5. A hűtés-kenés technikája

Kémiai és mechanikai tulajdonságaiknak köszönhetően a hűtő-kenő folyadékok jelentősen befolyásolhatják a megmunkálás folyamatát. Jersák és Kaplan teljesen új fejlesztésű, környezetbarát hűtő-kenő folyadékokat értékelték (Jersák és Kaplan, 2015). A Libereci Műszaki Egyetem megmunkálási laboratóriumában ezek hatását számos technológiai szempontból vizsgálták. Bemutatták a 16MnCr5 szerkezeti acél és az X2CrNiMo18-14-3 korrózióálló acél homlokmarási kísérleteinek eredményeit ezen újonnan kifejlesztett hűtő-kenő folyadékok felhasználásával.

Masmiati és szerzőtársai a kutatásukban a kenőanyag és a marási mód hatására összpontosítottak az S50C szénacél marása során (Masmiati et al., 2016). Az orsó fordulatszámát, az előtölést és a fogásmélységet, valamint a kenési és a marási módot kísérlettervezéssel optimalizálták. A matematikai modellt a válaszfelületi módszer alapján a maradék feszültség, a forgácsolóerő és a felületi érdesség előrejelzésére fejlesztették ki. A válaszfelületi ábrák azt mutatják, hogy az orsó fordulatszáma és az előtölés hatása kevésbé jelentős kis fogásmélységnél, de ez a hatás jelentősen növeli a maradék feszültséget, a forgácsolóerőt és a felületi érdességet a fogásmélység növekedésével.

Rao és szerzőtársai a fordulatszám hatását vizsgálták a forgácsolóerőre, a lapka kopására, a felület minőségére és a forgácsolási hőmérsékletre különféle hűtési stratégiát alkalmazva AISI316 ausztenites korrózióálló acél keményfém szerszámmal történő homlokmarásánál (Rao et al., 2019). A száraz, nedves és kriogén (LN₂) hűtési viszonyok mellett három különböző forgácsoló sebességgel, állandó előtölés és fogásmélység beállításával elvégzett kísérletek eredményeit dokumentálták. Az eredmények összehasonlításával bebizonyították az LN₂ megközelítés ésszerűségét és megvalósíthatóságát a folyamatparaméterek előre meghatározott körén belül.

A nanofolyadék minimális mennyiségű kenési technikát vizsgálták Singh és szerzőtársai AISI 304 korrózióálló acél keményfém lapkás szerszámmal történő homlokmarása során a szerszámkopás és a felületminőség tekintetében (Singh et al., 2019). A forgácsolási paramétereket ennek megfelelően úgy optimalizálták, hogy minimálisra csökkentsék a szerszámkopást és a felületi érdességet. Forgácsolási kísérleteket is végeztek, hogy összehasonlítsák a különféle hűtési technika alkalmazásával kapott eredményeket. Az eredmények azt mutatták, hogy a nanofolyadék minimális mennyiségű kenési technika alkalmazása esetén a szerszámok kopása kisebb volt, a felületminőség is jobb lett.

6. A marási folyamat és a marószerszám konstrukció fejlesztésének eredményei

Jawaid és szerzőtársai két PVD TiN bevonatú és egy bevonat nélküli, azonos geometriájú volfrámkarbid szerszám forgácsolási teljesítményét és meghibásodási jellemzőit vizsgálták (Jawaid et al., 2001). Inconel 718 szuperötvözetten végeztek homlokmarási kísérleteket, vizsgálták a forgácsoló sebesség és az előtölés hatását a szerszámok teljesítményére hűtőfolyadék alkalmazásával. Az eredmények azt mutatták, hogy a bevonat nélküli szerszám kisebb forgácsolási sebességnél jobban teljesített, míg a bevont szerszámok valamivel jobb teljesítményt nyújtottak a sebesség növelésekor.

Engin és Altintas az iparban használt legtöbb spirális szármaró általánosított matematikai modelljét (Engin és Altintas, 2001a) és a lapkás marók általánosított matematikai modelljét (Engin és Altintas, 2001b) mutatták be. A forgácsvastagságot a forgácsolóél minden pontján a marás valódi kinematikája alapján értékelték, beleértve a maró és a munkadarab szerkezeti rezgéseit is. A folyamat integrálásával a munkadarabbal érintkező egyes forgácsolóélek mentén előre megjósolhatók a forgácsolóerők, a rezgések, a felületi geometria és a rezgés-stabilitási területek. A javasolt megközelítés lehetővé teszi az iparban használt különféle marási műveletek tervezését és elemzését.

Karpuschewski és szerzőtársai egy rugalmas, univerzálisan alkalmazható szerszámrendszert fejlesztettek ki, amely hengeres száron alapul (Karpuschewski et al., 2007). Kutatási célokra a hengeres szár alkalmazása lehetővé teszi a tényleges forgácsolóél geometria egyszerű megváltoztatását. A szerszámon belül különböző forgácsolóél geometriák kombinációja is megtalálható. Forgácsolási kísérletek segítségével gyorsan és hatékonyan határozható meg és értékelhető a forgácsolóképződésre, az erőösszetevőkre és a dinamikus viselkedésre gyakorolt hatás.

Siller és szerzőtársai egy speciális keményfém szerszámkonstrukció hatását elemezték az edzett acél homlokmarásának folyamatképességére a felületminőség és a szerszám élettartam szempontjából (Siller et al., 2009). A kísérleti eredmények azt mutatták, hogy az Ra átlagos felületi érdesség értéke $0,1 \mu\text{m}$ és $0,3 \mu\text{m}$ között volt a munkadarabon elfogadható szerszám élettartam mellett. Megállapították, hogy ezek a szerszámok alkalmasak edzett acél alkatrészek befejező megmunkálására és versenyezhetnek más befejező eljárásokkal. Meghatározták a marási folyamat fő paramétereit (v_c és f_z), a felületi érdesség és a szerszámkopás morfológiája közötti kapcsolatot.

Keményfém alapú bevonatos lapkák forgácsolási tulajdonságait vizsgálta Martini és Morri alumínium ötvözet marása során (Martini és Morri, 2011). A CVD gyémánt bevonatú szerszám nagyon alacsony súrlódási együtthatót mutatott nagy terhelés mellett is, diffúzió nélkül és elhanyagolható kopás mellett. A marási tesztek során a szerszám geometriáját azonosították a fő paraméterként a szerszám teljesítményének befolyásolásában.

Beňo és szerzőtársai bemutatták a száras lapkabefogóval ellátott fejlett marószerszámok alkalmazásával kapcsolatos eredményeiket (Beňo et al., 2012). A síkfelületek marása során fellépő forgácsolóerők mérése alapján azonosították a kritikus forgácsolási körülményeket, amelyek a szerszám sérüléséhez vezetnek, és összehasonlították ezeket a kereskedelmi forgalomban lévő marókkal. A forgácsolóerő adatok felhasználásával az üzembiztonságot vizsgálták a szerszámhiba külső megjelenésére vonatkozóan. FEM-modellezéssel állapították meg azt a maximális feszültséget, amely a száras lapkabefogó képlékeny törését okozza. A felületi érdesség és a rövidtávú szerszámkopás vizsgálata a szerszám teljesítmény kritériuma volt, hogy értékeljék az új forgácsolószerszámok képességét a homlokmarási műveletekben.

Zarkti és szerzőtársai kidolgoztak egy automata forgácsoló szerszám kiválasztó rendszert a maráshoz a gyártás jellemzői alapján (Zarkti et al., 2015). Ez a rendszer STEP fájlt használ bemenetként és képes felismerni a funkciókat a felismerő modulon keresztül. A rendszer lehetőséget biztosít a gyártandó alkatrész tűréseinek kinyerésére, értelmezésére és az egyes gyártási jellemzők megfelelő marószerszámhoz való hozzárendelésére is. Tanulmányozták a marási folyamatot és a paramétereit, javaslatot tettek egy szerszámválasztó modulra és egy matematikai modellre a megmunkálási feltételek optimalizálása érdekében, ami a gyártási költségek és a gyártási idő minimalizálása révén a folyamat hatékonyságának maximalizálásához vezet.

Karpuschewski és szerzőtársai azt vizsgálták, hogy a különböző szerszámgeometriai jellemzők hogyan befolyásolják a felületek érdességi paramétereit normál és nagy előtolású homlokmarásnál (Karpuschewski et al., 2018). Ha az a_p/f_z (a_p : fogásmélység, f_z : fogankénti előtolás) arány eltérése bármely irányban jelentősen eltér az 1-es értéktől, akkor a forgács alakváltozásának jellemzői is megváltoznak, vagyis a deformáció vagy a palástfelületen lévő él, vagy a homlokél mentén megy végbe. Ennek eredményeként megváltoznak a lapkák éleire ható terhelések, az erőkomponensek, a hőhatások nagysága és iránya, így a mart felület érdessége is megváltozik, ebből következően a lapka éleinek helyzete is döntő jelentőségű. Azt tapasztalták, hogy az érdesség minimalizálható a 90° -os κ_r érték, a nagyobb a_p/f_z , $\gamma_f=0^\circ$ és $\gamma_p=0^\circ$ kiválasztásával (κ_r : főélelhelyezési szög, γ_f : radiális homlokszög, és γ_p : axiális homlokszög). Ugyanakkor $\kappa_r=45^\circ$ esetén a legkisebb érdesség érték a kisebb a_p/f_z aránynál és $\gamma_p=12^\circ$ -nál figyelhető

meg, de értéke valamivel nagyobb az előző esethez képest. Kedvező felületi érdesség érhető el 45° és 90° κ_r esetén is, ha $a_p/f_z=10$ és $\gamma_p=12^\circ$.

Borysenko és szerzőtársai bemutatták az inverz forgácsolási arány ($b/h < 1$) és a makro forgácsolási geometria hatását a forgácsképződésre, a marási erőkre, a szerszám lehajlására, valamint a munkadarab felületi integritására homlokmarásnál (Borysenko et al., 2019). A vizsgálatok a DoE (Design of Experiment) módszeren 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.

Póka és Németh egy új szerszámmodellt javasoltak, amely figyelembe veszi a radiális homlokszöveget (Póka és Németh, 2019). Új módszert dolgoztak ki a forgácsvastagság kiszámítására, amely az új szerszámmodellt használja, és számos létező numerikus és közelítő módszeren alapul. Bebizonyították, hogy a pontos eredmények kiszámításához figyelembe kell venni a radiális homlokszög hatását, kisebb előtolás esetén azonban ez a hatás jelentéktelen. A bemutatott eljárásokat a pontosságuk és a számítási követelmények szempontjából értékelték. A javasolt új módszereket forgácsolási kísérletekkel igazolták.

7. Összefoglalás

A 3. résszel teljessé vált a homlokmarás szakirodalomban megjelent kutatási eredményeit rendszerező és röviden ismertető cikksorozat. Ebben a cikkben az alábbi területek kerültek bemutatásra a homlokmarás tudományterületéről: a megmunkálás hatékonyságának vizsgálata, a megmunkálási folyamat stabilitásának és a keletkező rezgéseknek a vizsgálata, a sorjaképződés mechanizmusa és a sorja csökkenésének lehetőségei, a hűtő-kenő anyagok alkalmazásának vizsgálata, a homlokmarási folyamat és a marószerszám konstrukciós fejlesztése.

Irodalom

- [1] Budak, E., Tekeli, A. (2005). Maximizing chatter free material removal rate in milling through optimal selection of axial and radial depth of cut pairs. *CIRP Annals*, 54(1), 353–356. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60121-8](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60121-8)
- [2] Coelho, R. T., de Souza, A. F., Roger, A. R., Rigatti, A. M. Y., Ribeiro, A. L. (2010). Mechanistic approach to predict real machining time for milling free-form geometries applying high feed rate. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 46, 1103–1111. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2183-8>
- [3] Vila, C., Siller, H. R., Rodriguez, C. A., Bruscas, G. M., Serrano, J. (2012). Economical and technological study of surface grinding versus face milling in hardened AISI D3 steel machining operations. *International Journal of Production Economics*, 138(2), 273–283. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.03.028>
- [4] Parashar, V., Purohit, R. (2017). Investigation of the effects of the machining parameters on material removal rate using Taguchi method in end milling of steel grade EN19. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 336–341. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.01.030>
- [5] Kunderák, J., Molnár, V., Deszpoth, I. (2018a). Productivity analysis of machining milled surfaces. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 448(1), 012012. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/448/1/012012>

- [6] Kundrák, J., Molnár, V., Deszpoth, I., Makkai, T. (2018b). Effect of cutting data selection on productivity in face milling. *Cutting & Tools in Technological Systems*, 88, 101–106.
- [7] Kundrák, J., Molnár, V., Makkai, T., Dági, T. (2019a). Analysis of material removal efficiency in face milling of aluminum alloy. In Gapiński, B., Szostak, M., Ivanov, V. (Eds.), *Advances in Manufacturing II. MANUFACTURING 2019, Lecture Notes in Mechanical Engineering* (pp. 393–404). Cham, Svájc, Springer International Publishing.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-16943-5_34
- [8] Kundrák, J., Molnár, V., Deszpoth, I., Makkai, T. (2019b). Productivity considerations in face milling. *Materials Science Forum*, 952, 66–73.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.952.66>
- [9] Kundrák, J., Molnár, V., Makkai, T. (2019c). Anyagleválasztási hatékonyság vizsgálata alumíniumötvözet homlokmarásánál. *Gépgyártás*, 58(1-2), 87–93.
- [10] Shinge, A. R., Dabade, U. A. (2018). The effect of process parameters on material removal rate and dimensional variation of channel width in micro-milling of aluminium alloy 6063 T6. *Procedia Manufacturing*, 20, 168–173. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.024>
- [11] Gurdal, O., Wright, A., Carpenter, C., Blackmore, M. (2018). Investigation of the performance of different face milling inserts to improve rough milling of SA508 grade 3 forgings. *Proceedings of the ASME 2018 Pressure Vessels and Piping Conference PVP 2018, Volume 6A: Materials and Fabrication*. <https://doi.org/10.1115/PVP2018-84337>
- [12] Insperger, T., Mann, B. P., Stépán, G., Bayly, P. V. (2003). Stability of up-milling and down-milling, Part 1: Alternative analytical methods. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 43(1), 25–34. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(02\)00159-1](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00159-1)
- [13] Mann, B. P., Insperger, T., Bayly, P. V., Stépán, G. (2003). Stability of up-milling and down-milling, Part 2: Experimental verification. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(1), 35–40. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(02\)00160-8](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00160-8)
- [14] Insperger, T., Gradišek, J., Kalveram, M., Stépán, G., Weinert, K. W., Govekar, E. (2006). Machine tool chatter and surface location error in milling processes. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 128(4), 913–920. <https://doi.org/10.1115/1.2280634>
- [15] Insperger, T., Mann, B. P., Surmann, T., Stépán, G. (2008). On the chatter frequencies of milling process with runout. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(10), 1081–1089. <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2008.02.002>
- [16] Karpuschewski, B., Batt, S. (2007). Improvement of dynamic properties in milling by integrated stepped cutting. *Cirp Annals - Manufacturing Technology*, 56(1), 85–88.
<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2007.05.001>
- [17] Antonialli, A. Í. S., Diniz, A. E., Pederiva, R. (2010). Vibration analysis of cutting force in titanium alloy milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 50(1), 65–74.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2009.09.006>
- [18] Quintana, G., Ciurana, J. (2011). Chatter in machining processes: A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 51(5), 363–376.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2011.01.001>
- [19] Ji, C., Liu, Z., Ai, X. (2014). Effect of cutter geometric configuration on aerodynamic noise generation in face milling cutters. *Applied Acoustics*, 75, 43–51.
<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2013.07.004>

- [20] Munoa, J., Beudaert, X., Dombóvári, Z., Altintas, Y., Budak, E., Brecher, C., Stépán, G. (2016). Chatter suppression techniques in metal cutting. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 65(2), 785–808. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.004>
- [21] Svinin, V. N., Nikulin, D. S. (2019). Studying the dynamics of cutting process by a face mill cutter. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 632(1), 012112. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/632/1/012112>
- [22] Chern, G.-L. (2006). Experimental observation and analysis of burr formation mechanisms in face milling of aluminum alloys. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46(12–13), 1517–1525. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.09.006>
- [23] Mátyási, G., Rakita, T. (2012). Analysis and control of burr formation in face milling of aluminium alloy. *Proceedings of the Thirteenth International Conference on Tools: ICT 2012*, 293–298.
- [24] da Silva, L. C., da Mota, P. R., da Silva, M. B., Ezugwu, E. O., Machado, Á. R. (2014). Study of burr behavior in face milling of PH 13-8 Mo stainless steel. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 8, 34–42. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2014.10.003>
- [25] Póka, G., Mátyási, G., Németh, I. (2016). Burr minimisation in face milling with optimised tool path. *Procedia CIRP*, 57, 653–657. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.113>
- [26] Jersák, J., Kaplan, F. (2015). Comparison of the influence of process fluids on tool life in face milling. *Manufacturing Technology*, 15(6), 977–984. <https://doi.org/10.21062/ujep/x.2015/a/1213-2489/MT/15/6/977>
- [27] Masmiahi, N., Sarhan, A. A. D., Hassan, M. A. N., Hamdi, M. (2016). Optimization of cutting conditions for minimum residual stress, cutting force and surface roughness in end milling of S50C medium carbon steel. *Measurement*, 86, 253–265. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.02.049>
- [28] Rao, K. M. C., Malghan, R. L., Herbert, M. A., Rao, S. S. (2019). Dataset on flank wear, cutting force and cutting temperature assessment of austenitic stainless steel AISI316 under dry, wet and cryogenic during face milling operation. *Data in Brief*, 26, 104389. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104389>
- [29] Singh, P., Dureja, J. S., Singh, H., Bhatti, M. S. (2019). Performance evaluation of coated carbide tool during face milling of AISI 304 under different cutting environments. *Materials Research Express*, 6(5), 056546. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab0696>
- [30] Jawaid, A., Koksai, S., Sharif, S. (2001). Cutting performance and wear characteristics of PVD coated and uncoated carbide tools in face milling Inconel 718 aerospace alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 116(1), 2–9. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00850-0](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00850-0)
- [31] Engin, S., Altintas, Y. (2001a). Mechanics and dynamics of general milling cutters. Part I: Helical end mills. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41(15), 2195–2212. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(01\)00045-1](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(01)00045-1)
- [32] Engin, S., Altintas, Y. (2001b). Mechanics and dynamics of general milling cutters. Part II: Inserted cutters. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41(15), 2213–2231. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(01\)00046-3](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(01)00046-3)
- [33] Karpuschewski, B., Emmer, T., Schmidt, K., Nguyen D. T. (2007). Rundschafft Werkzeugsystem – universell und flexibel einsetzbar in Forschung und Produktion. *Proceedings of 12th International Conference on Tools ICT-2007*, 53–62.

- [34] Siller, H. R., Vila, C., Rodríguez, C., Abellán, J. V. (2009). Study of face milling of hardened AISI D3 steel with a special design of carbide tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 40, 12–25. <https://doi.org/10.1007/s00170-007-1309-0>
- [35] Martini, C., Morri, A. (2011). Face milling of the EN AB43300 aluminum alloy by PVD- and CVD-coated cemented carbide inserts. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 29(6), 662-673. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2011.04.015>
- [36] Beňo, J., Maňková, I., Vrabel, M., Karpuschewski, B., Emmer, T., Schmidt, K. (2012). Operation safety and performance of milling cutters with shank style holders of tool inserts. *Procedia Engineering*, 48, 15–23. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.09.479>
- [37] 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 2015*.
- [38] Karpuschewski, B., Kundrák, J., Felhő, C., Varga, G., Borysenko, D. (2018). Effects of the tool edge design on the roughness of face milled surfaces. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 448(1), 012056. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/448/1/012056>
- [39] Borysenko, D., Karpuschewski, B., Welzel, F., Kundrák, 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>
- [40] Póka, G., Németh, I. (2019). The effect of radial rake angle on chip thickness in the case of face milling. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 234(1–2), 40–51. <https://doi.org/10.1177/0954405419849245>