

A HOMLOKMARÁS KUTATÁSÁNAK FŐBB EREDMÉNYEI 2. RÉSZ: AZ ÉRDESSÉG ÉS ALAKHIBA VIZSGÁLATA, FORGÁCSO- LÁSI PARAMÉTEREK OPTIMALIZÁLÁSA

Makkai Tamás 

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

Absztrakt

Az 1. rész a homlokmarás területén a forgácsolóerő kutatásának szakirodalmát mutatta be, ez a cikk a homlokmarás további, átfogó kutatási eredményeit ismerteti. A szakirodalomban megjelent eredményeket összefoglalva az alábbi kutatási területek jelennek meg ebben a részben: a felületi érdesség vizsgálata, technológiai adatokkal való kapcsolata, előrejelzésének módszerei; mart felületek alakhibájának vizsgálata; optimális forgácsolási paraméterek meghatározásának módszerei és alkalmazásuk.

Kulcsszavak: homlokmarás, szakirodalmi összefoglalás, felületi érdesség, alakhiba, forgácsolási paraméterek optimalizálása

Abstract

In the 1st part, the literature on the research of cutting force in the field of face milling was presented, this paper describes further, comprehensive research results of face milling. Summarizing the results published in the literature, the following research areas are presented in this section: examination of surface roughness, its relationship with technological data, methods of its prediction; examination of shape error of milled surfaces; methods of determining optimal cutting parameters and their application.

Keywords: face milling, literature review, surface roughness, shape error, optimization of cutting parameters

1. Bevezetés

A gépipari termékekben lévő alkatrészek felületeinek állapota a működésük szempontjából nagy jelentőséggel bír. Az alkatrészarajzon előírt felületi érdességre vonatkozó előírásokat a gyártási folyamatban a felület befejező megmunkálási művelete során kell megvalósítani. A homlokmarás technológiája és a gyártás technikai feltételei lehetővé teszik, hogy a homlokmarást befejező megmunkálásként is alkalmazzák a forgácsoló megmunkálásnál. A homlokmart felület érdességét elsősorban a marószerszám élgeometriája, az axiális fogásmélység és a fogankénti előtolás határozzák meg. A kialakuló felületi érdességre vonatkozó összefüggések feltárása elősegíti annak előrejelezhetőségét, tervezhetővé válik a felület érdessége.

A mikrogeometriai jellemzők mellett lényeges a felület makrogeometriájára vonatkozó előírások betartása, a megmunkált felület alakeltérése a meghatározott alaktúrénál nem lehet nagyobb. A kutatások során vizsgálták az alakeltérésre vonatkozóan a forgácsolási paraméterek és a marás egyéb jellemzőinek hatását.

Az optimális gyártásnál cél a lehető legnagyobb termelékenység elérése a lehető legkisebb költséggel. A megmunkálás termelékenységére hatással vannak egyes forgácsolási paraméterek. A kutatások feltárták az erre vonatkozó összefüggéseket, a költségeknél figyelembe vették többek között a szerszám élettartamot. Többféle optimalizálási módszer alkalmazását írták le, vannak kutatók, akik a módszerek összehasonlítását is elvégezték. Az eljárással többféle forgácsolási adat és egyéb jellemző optimális értéke meghatározható. Az elméleti optimalizálási módszereket többen gyakorlati vizsgálatokkal, forgácsolási kísérletekkel is validálták, a módszerek használhatóságát igazolták.

A cikk összefoglalja a homlokmarás területén a felület érdességének és az alakhibának a vizsgálatával, valamint a folyamat optimalizálásával kapcsolatban megjelent szakirodalmi eredményeket.

2. A felületi érdesség vizsgálata

Diniz és Filho azt vizsgálták, hogy a szerszám és a munkadarab relatív helyzete milyen hatást gyakorol a szerszám élettartamára és a munkadarab felületének érdességére síkfelületek homlokmarása során (Diniz és Filho, 1999). Több marási kísérletet végeztek a szerszám és a munkadarab különböző relatív helyzeteivel. Egy adott forgácsolási idő elteltével megmérték a szerszám hátkopását és a munkadarab felületi érdességét. Azt tapasztalták, hogy a munkadarab felületi érdességét nem befolyásolja jelentősen a relatív helyzet változása és az érdesség növekedése nincs szoros összefüggésben a főforgácsolóél kopásának növekedésével.

Felhő és Kundrák kidolgoztak egy olyan módszert, amely meghatározza az elméleti és a mért érdességi paraméterek közötti matematikai kapcsolatot a határozott élgeometriájú szerszámokkal végzett forgácsolásnál (Felhő és Kundrák, 2012). A vizsgált esetekben a kidolgozott matematikai modell és számítási módszer segítségével esztergálásnál meghatározható az elméleti érdesség. A modell ezenkívül használható a meghatározott élgeometriával rendelkező forgószerszámmal történő forgácsolás során kialakuló elméleti érdesség meghatározására is.

Luejanda és Jirapattarasilp a felületi érdességet tanulmányozták AISI 304 korrózióálló acél homlokmarásánál (Luejanda és Jirapattarasilp, 2013). A kísérleteket háromféle forgácsoló sebességgel, fogásmélységgel és előtolással végezték el keményfém szerszámmal. Az átlagos felületi érdesség (R_a) értékeket ANOVA (varianciaanalízis) módszerrel elemezték, megvizsgálták a fő befolyásoló tényezőket és azok kölcsönhatásait. Megállapították, hogy a nagyobb előtolás jobb felületminőséget eredményezett. A nagy előtolási sebességgel alkalmazott kis forgácsoló sebesség javíthatja a felület minőségét. Kisebb fogásmélység és nagyobb előtolás alkalmazásával jobb felületi érdességet kaptak.

Hricová és Náprstková statisztikai kísérlettervezést alkalmazva megvizsgálták a kiválasztott forgácsolási paraméterek és a hűtőfolyadék hatását a marással megmunkált alumíniumötvözet felületi érdességére (Hricová és Náprstková, 2015). A kísérletekhez három forgácsolóélel rendelkező keményfém marószerszámot használtak. A vizsgált bemeneti paraméterek a spirálszög, a forgácsoló sebesség és a hűtőfolyadék használata voltak. Az ANOVA alkalmazásával a spirálszöget találták a legjelentősebb paraméternek, a többi nem volt statisztikailag szignifikáns.

Karkalos és szerzőtársai a kísérletekben a marási körülményeknek a munkadarab felületi minőségére gyakorolt hatását figyelték meg (Karkalos et al., 2016). Három értéket vettek figyelembe a fogásmélységre, a forgácsoló sebességre és az előtolási sebességre vonatkozóan, az előírt kombinációk esetén a felületi érdesség mérésére került sor. A válaszfelületi módszertan (Response Surface Methodology - RSM) segítségével matematikai összefüggést állítottak elő a bemeneti változók és a kimeneti paraméter között. A modell megfelelőségét varianciaanalízissel tesztelték. Arra a következtetésre jutottak, hogy az előtolási sebesség meghatározó szerepet játszik a folyamat kimenetelében. Az analízis eredményei 3D-

s grafikonokon ábrázolhatók, amelyek felhasználhatók a felületi érdesség becslésére bármely adott forgácsolási körülmény esetén a korlátokon belül. Ezenkívül javasolták a folyamat optimalizálását a modellen keresztül. Az eredmény azt mutatta, hogy a kis előtolási sebesség kis felületi érdességhez vezet. Az ANN (Artificial Neural Networks – mesterséges neurális hálózatok) modellek és az RSM modellek összehasonlítását is elvégezték, és közölték mindkét módszer előnyeit és hátrányait.

Az egyenetlenség értékei a homlokmarásnál mind az előtolás irányával párhuzamos síkokban, mind a vele szöveget bezáró síkokban változhatnak, ezért különösen fontos, hogy meg lehessen tervezni a felületek érdességét. Kundrák és Felhő egy új módszert vezettek be a forgácsolt felületek érdességi jellemzőinek megtervezésére, amellyel meghatározhatók a határozott élgeometriájú szerszámok által létrehozott felületek érdességi jellemzőinek elméleti értékei (Kundrák és Felhő, 2016). Gyakorlatilag bármilyen összetett szerszámgeometria modellezhető vele és meghatározhatók a 3D érdességi paraméterek. A forgó szerszámok alkalmazásakor többféle szerszámkialakítást és beállítási pontosságot is figyelembe vettek az egynél több él egyidejű forgácsolására vonatkozó elméleti értékek meghatározásakor. Homlokmarásnál két különböző lapka geometriával elvégezték az elméleti értékek összehasonlítását a leírt módszerrel és matematikai összefüggéseket fogalmaztak meg az elméleti és a valós érdesség értékek között.

Kundrák és Felhő a forgácsolási paraméterek változásának hatását vizsgálták a homlokmarással megmunkált felületek két- és háromdimenziós érdességi paramétereire (Kundrák és Felhő, 2018). Arra összpontosítottak, hogy az előtolás és a fogásmélység arányának változása hogyan befolyásolja a generált felületi topográfiát és annak paramétereit állandó értékű deformálatlan forgácskeresztmetszet esetén. Az érdesség fokozatosan romlott az f_z fogankénti előtolás növekedésével az egyetlen lapkával szerelt homlokmaró szerszám alkalmazásánál. A kísérletekben kereskedelmi marófejeket és lapkákat használtak. Bemutatták, hogy az egyes lapkák beállítási hibái hogyan befolyásolják a megmunkált felületek érdességi paramétereit. Tapasztalatuk szerint a lapka és a marófej összeszerelése olyan ütést eredményezhet, amely jelentős hatással van a topográfiára.

Kundrák és szerzőtársai azt elemezték, hogyan változnak a 2D és 3D érdességi paraméterek az alumínium alkatrészek sík felületeinek szimmetrikus marása során az előtolás irányával párhuzamos síkokban (Kundrák et al., 2018a). Megállapították, hogy a szimmetriasíkkal párhuzamos síkok érdességi értékei különböznek. Az érdesség elméleti értékei a szimmetriasík két oldalán egyenlő távolságra lévő síkban megegyeztek, de a megmunkált felületen különböztek. Az okát annak tulajdonították, hogy a szimmetriasík egyik oldalán egyenirányú, a másik oldalán ellenirányú marás van.

Hernández-González és szerzőtársai az ausztenites AISI 304 rozsdamentes acél bevonat nélküli keményfém lapkás maróval végzett száraz marásánál azt vizsgálták, hogy az előtolás és a forgácsoló sebesség milyen hatással van a felületi érdességre és a keménységre (Hernández-González et al., 2018). Az eredmények azt mutatták, hogy a megmunkálás a munkadarab keménységét a kezdeti keménységhez képest csökkentette, azonban az előtolás és a forgácsoló sebesség nem mutatott rá statisztikailag szignifikáns hatást. A kisebb felületi érdesség értékeket nagyobb forgácsoló sebességek és kisebb előtolások esetén kapták. Az elemzések azt mutatták, hogy a megfelelő felületi érdesség elérhető a kis előtolás és kis forgácsoló sebesség értékek esetén is. A köszörülési műveletet el lehet hagyni. Meghatározták az előtolás, a forgácsoló sebesség és a felület érdessége közötti korrelációs egyenletet.

Nagy és Kundrák az előtolás növelésének a felületi érdességre gyakorolt hatását vizsgálták (Nagy és Kundrák, 2019; Nagy, 2019). Szimmetrikus homlokmarást végeztek paralelogramma alakú lapkával szerelt marófejjel, ahol a fogankénti előtolást változtatták, a fogásmélységet és a forgácsolási sebességet állandó értéken tartották. A felület érdességét három párhuzamos síkban (a szimmetriasíkban, valamint

attól azonosan 20 mm távolságra lévő síkokban mindkét oldalon) mérték, a paraméterek 2D és 3D értékeit elemezték és értékelték. Azt tapasztalták, hogy a nagyobb fogásmélység és a kisebb előtolás beállítása nagyon csekély változást okozott az érdességi értékekben. Ha azonban $a_p/f_z \leq 1$ arányt állítottak be, akkor az érdességi paraméterek értékei jelentősen megnöttek. A maximális felületi érdesség értékeit nem mindig a szimmetriasíkban mérve tapasztalták, ezért nem csak a szimmetriasíkban, hanem a párhuzamos síkokban is javasolt a felületi érdesség ellenőrzése a helyes értékelés érdekében.

Kundrák és szerzőtársai a szimmetrikus homlokmarással előállított felület érdességét vizsgálták különböző forgácsolási sebességeknél kör alakú lapka használatával (Kundrák et al., 2019a). A 2D és 3D felületi érdesség méréseket három, az előtolási iránnyal párhuzamos mérési síkban végezték el. Azt tapasztalták, hogy a felületi érdesség a 100 m/perc feletti forgácsolási sebesség értékeknél jelentősen csökkent, majd ennek változása minimális lett. A szimmetriasíkban nagyobb felületi érdességet figyeltek meg, mint a többi párhuzamos síkban, és szinte minden esetben a felületi érdesség nagyobb volt a belépési oldali síkban, mint a kilépési oldali síkban.

Nagy és Kundrák paralelogramma alakú lapkával homlokmart felület érdességi jellemzőit vizsgálták (Nagy és Kundrák, 2020). Megállapították, hogy az érdesség a kapott mintázat különböző részein változik, és ennek jellegét és a szóródás nagyságát a teljes felületre vonatkozó átlag alapján elemezték. Előtolással párhuzamos irányú méréseknél az Rz (egyenletlenség-magasság) paraméter a szimmetriasíkban volt a legnagyobb, merőleges irányban az érdesség értékek középen voltak a legkisebbek és a távolsággal nőttek.

Kundrák és Nagy a felületi érdesség változását vizsgálták szimmetrikus homlokmarás során (Kundrák és Nagy, 2020a). A kísérletek során kör alakú marólapka különböző előtolási értékek mellett történő alkalmazásának hatását vizsgálták a mart alkatrészek topográfiájára. 2D és 3D felületi érdességméréseket végeztek három, az előtolási iránnyal párhuzamos síkban, amelyek a szimmetriasíkban, és attól azonos távolságra, de ellentétes oldalon lévő két síkban voltak. Azt tapasztalták, hogy a felületi érdesség fokozatosan növekedett az előtolási sebesség növekedésével, a nagyobb felületi érdesség értékek a szimmetriasíkban voltak.

Kundrák és Nagy konfokális kromatikus szenzorral vizsgálták a mérési sebesség és a pontsűrűség hatását az érdességmérés során a területi érdességre (Kundrák és Nagy, 2020b). A mérési sebesség változtatása a szimmetriasíkban lévő területen kis eltéréseket eredményezett az érdességi értékekben, a sebesség növekedésével az Sa (3D átlagos érdesség), Sq (simasági mérőszám) értékek véletlenszerűen változtak, az Sz (3D egyenletlenség-magasság), Ssk (ferdeség) és Sku (lapultság) értékek pedig csökkentek.

Kundrák és szerzőtársai gyémánt szerszámmal homlokmart felületek érdességi paramétereit vizsgálták (Kundrák et al., 2020). Elemezték az érdességi profildiagram változásait és az érdességi értékeket az előtolási sebesség függvényében. Az előtolási sebesség hatása trendként jelent meg, az előtolás növelése az érdesség paraméterek értékének növekedését okozta. A kísérleti eredményekből az is kiderült, hogy az Ra és Rz maximális értékei szignifikánsan alacsonyabbak voltak, mint a korábban keményfém szerszámmal hasonló előtolási sebességekkel mart felületeken mért értékek.

Nagy és Kundrák az érdesség változását vizsgálták paralelogramma alakú lapkával mart felület különböző pontjaiban (Nagy és Kundrák, 2021). A 2D-s érdességet az előtolással párhuzamos és arra merőleges irányokban mérték. Azt tapasztalták, hogy az Ra és az Rz paraméterek értékei szignifikánsan szóródtak. Megállapították, hogy az érdesség értékek nagysága a szimmetriasíktól való távolságtól és a pont felületi elhelyezkedésétől függ, így az előtolási iránnyal párhuzamos síkban jellemzően az értékek kis eltérése várható. A legnagyobb érdességet a felület azon oldalán mérték, ahol a szerszám éle belépett

a munkadarabba, ahol az érdességértékek növelték az átlagot. A szimmetriasíokban mért értékek közel voltak az átlaghoz.

Szimmetrikus homlokmarással előállított felületeken végzett érdességi vizsgálatot Nagy és bemutatta inhomogenitási elemzését (Nagy, 2021a). Elemezte az előtolás és a forgácsoló sebesség hatását. Azt tapasztalta, hogy az érdesség az előtolással együtt növekedett, az Ra és az Rz értékei közel lineárisan változtak. Nagyobb előtolásnál nagyobbak voltak az érdességi értékek közötti különbségek, azok a szimmetriasíokban növekedtek a legnagyobb mértékben. A forgácsoló sebesség növelésével az érdesség csökkent, de ez a csökkenés egy adott érték felett már nem volt számottevő. A szimmetriasíokban mérte a legnagyobb érdességet, attól távolodva csökkentek az értékek. A 3D-s érdességi paraméterek esetében azonos jelleget tapasztalt. A nagyobb sebességeknél sokkal simább volt a felület, a mintázatát közel szabályosnak találta.

Nagy a mérési hossz hatását elemezte a homlokmaró felület érdességére a fő mérési irányban a konfokális kromatikus szenzorral való mérésnél (Nagy, 2021b). A mérési hosszt a fogankénti előtolás többszöröseként állította be, öt 3D-s érdességi paraméter alapján végezte el az elemzést. A mért értékek szóródása alapján megállapította, hogy a területi érdesség mérésénél a mérési hosszt legalább a fogankénti előtolás 15-szörösére ajánlott felvenni. Az előtolás növelése általában az eltérések kismértékű változását eredményezte.

Pimenov és szerzőtársai leírták, hogy a homlokmaró és munkadarab relatív helyzete, valamint a marási kinematika (egyen- vagy ellenirányú) befolyásolja a forgácsolóerőket és a megmunkált felület érdességét, ám ezt korábban nem vizsgálták kellőképpen (Pimenov et al., 2019). A forgácsolóerő összetevőinek értékei jelentősen változhatnak a homlokmaró munkadarabhoz viszonyított helyzetétől függően és hatással lehetnek a marási folyamatra. Lehetőség van a homlokmaró és a munkadarab olyan relatív helyzetének megválasztására, amely a legkisebb felületi érdességet biztosítja. Gyakorlati ajánlásokat adtak a homlokmaró szerszám munkadarabhoz viszonyított helyzetének és a marás kinematikájának megválasztásához.

Baek és szerzőtársai egy újonnan kifejlesztett matematikai modellt mutattak be a felület érdességének előrejelzésére homlokmarási művelet során (Baek et al., 1997). A modell figyelembe veszi a forgácsolási folyamat statikus és dinamikus összetevőit. Az előbbi magában foglalja a forgácsolási körülményeket, valamint az élprofil és a szerszámtestben lévő összes lapka ütését. A forgácsolási kísérletek során igazolták, hogy a modell jól előrejelzi a maximális és az átlagos felületi érdességet.

Franco és szerzőtársai a szerszám forgásából származó másodlagos alakítás („back cutting”) hatását vizsgálták a homlokmarásnál (Franco et al., 2008). A felületi érdességet kör alakú szerszám esetében modellezték. A kísérleti megfigyeléseket összehasonlították a felületi érdesség modell által nyújtott elméleti értékekkel, az eredmények között jó egyezést találtak. Elemezték a felülethibákat, értékelték a kísérletek és a számszerű előrejelzések közötti eltéréseket. Mind az elméleti, mind a kísérleti eredményekben hasonló tendenciát figyeltek meg Ra és Rt (maximális érdesség) esetében az előtolás függvényében.

Yang és szerzőtársai egy génextpressziós programozáson alapuló módszert javasoltak a maró felületek érdességi előrejelzési modelljének elkészítésére, amely ötvözi a genetikai algoritmus és a genetikai programozás előnyeit (Yang et al., 2011). A javasolt megközelítés megvalósíthatóságának és teljesítményének igazolására kísérleti tanulmányok készültek, amelyek összehasonlították ezt a megközelítést néhány korábbi munkával. A kísérleti eredmények azt mutatták, hogy ez egy hatékony módszer a felületi érdesség előrejelzésére.

Tapoglou és Antoniadis egy új szimulációs modellt fejlesztettek ki CAD környezetben (Tapoglou és Antoniadis, 2012). A modell a szerszám valódi kinematikáját szimulálja annak pontos geometriáját felhasználva, így képes előrejelezni az érdességet. A szimulációs modell pontosságát nagyszámú forgácsolási kísérlet segítségével ellenőrizték. A javasolt modell alkalmasnak bizonyult a homlokmarás optimális forgácsolási körülményeinek meghatározására. A szoftver könnyen integrálható különböző CAD-CAM rendszerekbe.

Ali Abotiheen és szerzőtársai az előtolásnak a felületi érdességre (R_a) és a forgácsolóerő összetevőire (F_c főforgácsolóerő és F_t előtolásirányú erő) gyakorolt hatását tanulmányozták titánötvözet homlokmarása során (Ali Abotiheen et al., 2013). A vizsgálatokat több előtolással végezték, miközben a fogásmélység és a forgácsoló sebesség állandó maradt a száraz forgácsolási körülmények között. Véges elemes modellezés (FEM) segítségével kifejlesztettek egy modellt a felületi érdesség előrejelzéséhez a homlokmarási folyamatban, előtolás irányú forgácsolóerővel és különböző előtolási sebességekkel száraz megmunkálási körülmények között. Megállapítást nyert, hogy jó egyezés van az előtolás irányú forgácsolóerő és a felületi érdesség tendenciája között a különböző előtolási sebességeknél.

Muñoz-Escalona és Maropoulos kifejlesztettek egy geometriai modellt a felület érdességének előrejelzésére négyyszögletes lapkával történő marás esetén (Muñoz-Escalona és Maropoulos, 2014). A modell a megmunkált felületen keletkezett szerszám lenyomat geometriai elemzésén alapul. A modellt alumíniumötvözet nagysebességű marásánál kapott kísérleti adatokkal validálták, különböző forgácsoló sebesség, fogankénti előtolás, axiális fogásmélység és szerszám csúcssugar értékek esetén. A kifejlesztett modell nemcsak az érdesség értékének előrejelzését teszi lehetővé, hanem a 2D felületi érdesség-profil kialakítását is.

Felhő és Kundrák egy analitikai modellt és vizsgálati módszert mutattak be, amelyek segítségével előrejelezték a felületi érdesség paramétereinek várható értékeit (Felhő és Kundrák, 2014). Forgácsolási kísérletekkel validálták a modellt 42CrMo4 anyagminőségű munkadarabok két különböző alakú lapkával elvégzett homlokmarásánál. Közelítő összefüggéseket határoztak meg, amelyek segítségével az elméleti adatokból kiszámíthatók a várható érdességi értékek. A felületi érdesség elméleti értéke ezzel a módszerrel jó közelítési pontossággal meghatározható.

Felhő és szerzőtársai egy új módszert vezettek be a felületi érdességi paraméterek várható értékének meghatározására homlokmarásnál, a korábban számított elméleti érdességadatok alapján (Felhő et al., 2015). Ezzel a módszerrel a homlokmarás felület elméleti topográfiája elemezhető és a felület tetszőleges pontjain meghatározható az érdesség elméleti értéke. Az elvégzett kísérletek és összehasonlító elemzések alapján megállapították, hogy a megadott paraméterekkel homlokmarás felületek várható érdessége jó közelítéssel meghatározható a javasolt számítási algoritmus segítségével.

A nagy terhelésnek kitett munkadarabok tervezésének jelenleg általánosan elterjedt módszere, hogy két vagy több különböző anyagú réteget egyesítenek. Párhuzamos megmunkálásnál azonban, ahol a forgácsolóél egy forgácsolószerszám-fordulat alatt az egyik anyagból a másikba kerül, az egyenlőtlen forgácsolási tulajdonságok jelentősen negatívan befolyásolják a szerszám kopását és a felület minőségét. Denkena és Hasselberg új megközelítéseket alkalmaztak a homlokmarási eljárással előállított felület alakjának előrejelzésére (Denkena és Hasselberg, 2015). Kísérleti megmunkálási tesztekkel vizsgálták az anyagkötésnél tapasztalható átmeneti eltérést, valamint a felület hullámosságát. A szerszám befogó hossza jelentősen befolyásolta a felület alakját. Az új modell magában foglalta a forgácsolószerszám kinematikáját és a folyamat dinamikáját is, jó előrejelzést adott a felületi minőségről.

Hadad és Ramezani a munkadarab felületén minták és textúrák generálását tanulmányozták homlokmarásnál, új és innovatív módszert és szimulációs modellt hoztak létre a felület mintázására (Hadad és

Ramezani, 2016). A mintákat a felületen a munkadarab és a szerszám meghatározott elhelyezése, különböző marási irányok, valamint az orsó speciális szögállása generálta egy hagyományos függőleges marógépen. Először a marószerszám geometriai modelljét dolgozták ki, majd ezt követően egy új szimulációs modellt hoztak létre a felületi minta homlokmarással való előállításához. A matematikai modellek bemutatták a vágószerszám geometriáját és helyzetét a térben. A módszernek az ellenőrzéséhez számítási és szimulációs programokat fejlesztettek ki. A szimuláció eredményei felhasználhatók a tényleges homlokmarási folyamat optimalizálására és a munkadarab felületminőségének javítására, valamint a felületi minta előrejelzésére az adott marási paraméterek alapján.

Wang és szerzőtársai kutatásokat végeztek egy olyan matematikai modell kifejlesztésére, amely a forgácsolószerszám felületi profil geometriáján alapul, hogy előre jelezhető legyen a felületi érdesség homlokmarásnál (Wang et al., 2019). A korábbi modelleket vagy a tökéletesen kerek szerszámcsúcsra, vagy nagyszámú kísérleten alapuló statisztikai elemzéssel vezették le. Az előtolási sebesség nagyságától függően három esetre dolgoztak ki új matematikai modelleket a háromszög alakú lapkával végzett homlokmarási folyamat átlagos érdességére, pontosságának ellenőrzésére marási kísérleteket végeztek. Az eredmények azt mutatták, hogy a matematikai modellek jó korrelációt mutattak a kísérleti eredményekkel.

Felhő és szerzőtársai különböző forgácsoló élgeometriákkal mart felületek topográfiáját elemezték (Felhő et al., 2020). A forgácsolási kísérletek elvégzése után összehasonlították a felület 2D és 3D érdességi paramétereit. Megállapították, hogy azok értékei között jelentős eltérés mutatkozik. A különböző változatokat az elérhető legkisebb érdesség értékek alapján rangsorolták és megállapították, hogy a kör alakú lapka adja a legkisebb érdesség értékeket. Megvizsgálták, hogy a korábban kidolgozott CAD modellel számított érdességi paraméterek mennyiben követik az élgeometria hatását. Megállapították, hogy a forgácsolt felülettel párhuzamos éllel dolgozó lapkákra nem célszerű a modellt alkalmazni, mert ha a szerszám letörésének hossza nagyobb, mint a fogankénti előtolás, akkor az érdesség paramétereinek elméleti értéke mindig egyenlő lesz nullával. A többi esetben a CAD modell jól alkalmazható a várható felületi érdesség meghatározására.

Schmitz és szerzőtársai a marófogak ütésének hatását vizsgálták a felület topográfiájára, a felületi helyzethibára és a stabilitásra a marásnál (Schmitz et al., 2007). Az ütés továbbra is fontos kérdés a megmunkálás során, mivel a kereskedelemben kapható marótestek gyakran jelentős eltéréseket mutatnak a fogak/lapkák radiális helyzeténél. Ezért az egyes marófogak forgácsterhelése változó, ami befolyásolja a megmunkálási folyamatot és a forgácsolóélek idő előtti tönkremeneteléhez vezethet. A hitelesített szimuláció segítségével megadták a felületi érdesség, az ütés és a fogankénti előtolás közötti grafikus összefüggést. Kimutatták, hogy a felületi érdesség helyi csökkenése állandó fogankénti előtolás esetén előfordulhat, ha az ütés változik.

Hassanpour és szerzőtársai a forgácsolási paraméterek és a megmunkált felület integritása közötti kapcsolatot vizsgálták ötvöztött acél keménymarásakor minimális mennyiségű kenőanyag használatával (Hassanpour et al., 2015). A forgácsoló sebességet, előtolást, tengelyirányú és sugárirányú fogásmélységet három szinten vették figyelembe. Ezután ezeknek a paramétereknek az érdességre, a textúrára, a mikrokeménységre, a fehér réteg vastagságára és a felületi kémiai összetételre gyakorolt hatását vizsgálták a válaszfelületi módszertan segítségével. A varianciaanalízis kimutatta, hogy a másodfokú polinom modellek alkalmasak a felületi érdesség és a mikrokeménység becslésére, míg a lineáris modell a fehér réteg vastagságának változását adja meg.

Mikó és szerzőtársai különféle 3D-s marási stratégia alkalmazásánál 42CrMo3 anyagminőségű munkadarabon vizsgálták a megmunkálási időt és a felület textúráját (Mikó et al., 2011). Bemutatták a felületi paraméterek, a marási technológia és a felületminőség összefüggéseit.

Ghoreishi és szerzőtársai a nagysebességű forgácsolási paraméterek hatását vizsgálták a megmunkált AL/SiC kompozit felületi érdességére és a forgácsolóerőre (Ghoreishi et al., 2018). A kísérlet során CO₂ kriogén hűtőfolyadékot és 15% szilíciumkarbidot tartalmazó AL/SiC kompozitot használtak. Az eredmények azt mutatták, hogy a CO₂ kriogén hűtőfolyadék használata 3–8%-kal növeli a forgácsolóerőt, de 19–23%-kal javítja a felület érdességét. Általánosan megállapították, hogy megfelelő felületi érdesség várható kisebb fogásmélység, a SiC részecskék méretével megegyező előtolás és nagyobb forgácsoló sebesség mellett.

3. Az alakhiba vizsgálata

Gu és szerzőtársai egy új modellt alkottak a felület síklapúsági hibáinak előrejelzésére homlokmarásnál (Gu et al., 1997). A modell magában foglalja a megmunkálási feltételek hatásait, a maróorsó és a munkadarab befogó elemek rugalmas deformációját és a statikus orsótengelydőlést. Egy- és többlapkás homlokmarási kísérleteket végeztek a felületi síklapúsági modell előrejelző képességének értékelésére. A modell előrejelzéseinek és méréseinek összehasonlítása jó egyezést mutatott. A statikus orsótengelydőlés hatása a felület síklapúsági hibájára nagyon jelentősnek bizonyult.

Varga és Kundrák homlokmarási kísérleteket végeztek alumínium alkatrészek felületi tulajdonságainak vizsgálatához (Varga és Kundrák, 2017). A kísérletek célja az volt, hogy meghatározzák a technológiai paraméterek (előtolás és forgácsoló sebesség) változásának hatását az alumínium alkatrészek homlokmarásánál a síklapúságra és a felületi érdességre. A legnagyobb érdességi értékeket a középsíkban találták, attól távolodva a vele párhuzamos síkokban az érdesség kisebb lett. A kisebb forgácsoló sebességnél (250 m/min) a síklapúság eltérése nem változott jelentősen az előtolás függvényében, míg a nagyobb forgácsoló sebességnél (300 m/perc), amikor az előtolást 0,1-ről 0,4 mm/fordulatra növelték, a síklapúsági eltérés majdnem a duplájára nőtt.

Sheth és George másodfokú regressziós modellt dolgoztak ki a síklapúság és a felületi érdesség előrejelzésére kovácsolt, öntött acél anyag homlokmarásánál a sebesség, az előtolás és a fogásmélység bemeneti paraméterek összefüggésében (Sheth és George, 2016). A kívánt síklapúság és felületi érdesség eléréséhez a megmunkálási paramétereket ellenőrizni kell. A folyamatparaméterek megfelelő kiválasztása prediktív modell segítségével érhető el. A bemeneti paraméterek jelentőségének megismerésére varianciaanalízist (ANOVA) végeztek. A modelltől és a kísérleti értékekből előrejelzett értékek nagyon közel álltak egymáshoz.

Varga és Pásztor a mart munkadarabok hengerességének változását vizsgálták AISI 1045 acél környezetbarát forgácsolásánál (Varga és Pásztor, 2012). Száraz marás esetén a forgácsolási sebesség növelése kisebb előtolás esetén a hengerességi hiba csökkenését eredményezte. Azt tapasztalták, hogy a legkisebb kopási sebesség akkor érhető el, ha a megmunkálási eljárás a legkisebb forgácsolási sebesség és előtolás értékekkel, valamint nagy mennyiségű hűtőfolyadék felhasználásával történik.

Mikó a koordináta mérőgépen alkalmazott különböző mérési stratégiák hatását vizsgálta, mart síkfelület esetén (Mikó, 2018). A kérdés az volt, hogy hogyan lehet minimalizálni a megfelelő mért érték mellett a mért pontok számát. A mérési folyamat szempontjából egy megfelelő stratégia kialakítása volt a cél, amely biztosítja a hibák valós értékét és a rövid mérési időt.

4. A forgácsolási paraméterek optimalizálása

Ng és szerzőtársai kísérleteket végeztek, hogy meghatározzák a szerszám helyzetének, a szerszámbevonatnak és a forgácsolási környezetnek a szerszám élettartamára, a szerszámkopás mechanizmusaira, a

forgácsolóerőkre, a forgácsképződésre, a forgácsolási hőmérsékletre és a munkadarab felületének érdességére gyakorolt hatását Inconel 718 anyag gömbvégű maróval végzett nagysebességű megmunkálása során (Ng et al., 2000). A hőmérsékletmérések azt mutatták, hogy a nagynyomású hűtőfolyadék alkalmazása jelentősen csökkentette a munkadarab hőmérsékletét a száraz forgácsoláshoz képest.

A hatékony folyamatszimulációs eszközök lehetővé teszik a folyamatok offline tervezését és a forgácsolási folyamatok optimalizálását. Az optimalizálási eljárás alapvető eleme az időfüggő alapértéket reprezentáló referenciapálya használata. Schwenzer és szerzőtársai két módszert mutattak be a referenciapálya meghatározására (Schwenzer et al., 2017). Az első módszer adaptív jelszűrőn alapul. A második módszer esetében kétrétegűre bővítik a modellalapú prediktív vezérlést: az első réteg kiszámítja az optimális referenciapályát, a második réteg vezérli a szerszámgépet. A modell online frissíthető, ezáltal lehetővé teszi a folyamat számára, hogy önállóan alkalmazkodjon a megváltozott peremfeltételekhez, például a szerszám kopásához vagy a gép viselkedésének megváltozásához.

Nath és szerzőtársai a megmunkálhatóságot és a folyamatköltség optimalizálását tanulmányozták többféle kemény ötvözet kör alakú váltólapkás másolómarókkal végzett homlokmarása során (Nath et al., 2015). A forgácsolási kísérleteket különböző forgácsoló sebesség és előtolás kombinációk mellett végezték el, a megmunkálhatóságot a szerszám élettartama és kopása, az anyagleválasztási sebesség, a forgácsolóerők és az erőviszonyok tekintetében vizsgálták. A költségoptimalizálási modell használatával a folyamatparamétereket optimalizálták, figyelembe véve az anyagleválasztási sebesség és a szerszám élettartam közötti kompromisszumot.

Az optimális megmunkálási paraméterek kiválasztása a minőség, a termelékenység és a jövedelmezőség szempontjából rendkívül fontos. Kaya és Akyüz egy áttekintés keretében bemutatta a legjelentősebb forgácsolási paraméterek hatását a különböző megmunkálhatósági jellemzőkre nikkal alapú szuperötvözetek megmunkálásánál (Kaya és Akyüz, 2017).

Aykut és szerzőtársai egy új, többcélú optimalizálási megközelítést javasoltak a kobaltalapú ötvözetek homlokmarásánál a forgácsolási feltételek optimális értékeinek kiválasztásához (Aykut et al., 2012). Ennek a megközelítésnek a célja a lehetséges gyártási hibák kezelése volt a tervezési szakaszban. Megvizsgálták a forgácsoló sebesség, az előtolás és a fogásmélység hatását a forgácsolóerőkre száraz megmunkálási körülmények között. Az anyagleválasztási sebesség értékeit is meghatározták. A forgácsolóerők minimalizálását és az anyagleválasztási sebesség maximalizálását tartották célnak.

Kundrák és szerzőtársai a homlokmarási folyamat paraméterei és a forgácsolóerők közötti összefüggést vizsgálták (Kundrák et al., 2018b). A kísérleti munka a Design of Experiments (DoE) módszertan alapján történt. Az eredményeket statisztikai elemző eszközökkel dolgozták fel és meghatározták az erők és a folyamatparaméterek közötti korrelációs összefüggéseket. Végül meghatározták a forgácsolóerők minimalizálásához szükséges optimális folyamatparamétereket. Ezek az értékek a legkisebb előtolás és fogásmélység, valamint a közepes szinthez tartozó forgácsoló sebesség lettek.

Lin rozsdamentes acél homlokmarására szolgáló optimalizálási technikát mutatott be (Lin, 2002). A forgácsoló sebességet, az előtolást és a fogásmélységet optimalizálta, figyelembe véve a leválasztott forgácsstérfogatot, a felület érdességét és a sorja magasságát. Meghatározták az optimális forgácsolási paramétereket és a súlyozási tényezőt, amelyek jelentősen befolyásolják a többszörös teljesítményjellemzőket. A módszernek a hatékonyságát kísérleti eredményekkel igazolták.

Bağcı és Aykut a megmunkálási paraméterek, köztük a forgácsoló sebesség, az előtolás és a fogásmélység hatását tanulmányozták a szerszámkopásra, az anyagleválasztási sebességre, a forgácsolóerőkre és a teljesítményre a Stellite 6 szimmetrikus és aszimmetrikus homlokmarásánál bevont és bevonat nélküli lapkával (Bağcı és Aykut, 2014). Száználkán kísérletet végeztek különböző megmunká-

lási körülmények között. A marási paraméterek beállítása általános teljes faktoriális tervezési módszerrel történt. A varianciaanalízist a megmunkálási paraméterek forgácsolóerőkre gyakorolt hatásának vizsgálatára alkalmazták. A forgácsoló sebességnek a forgácsolóerőkre gyakorolt hatását nem tapasztalták. A fogásmélység nagyobb hatással van az eredő forgácsolóerőkre. Azt tapasztalták, hogy ha növelik az előtolási sebességet és a fogásmélységet, a forgácsolási teljesítmény növekszik és az aszimmetrikus marási stratégia jobbá válik a nagyobb teljesítményigényű szimmetrikus maráshoz képest. Ezenkívül a szerszám élettartamának végét gyakrabban okozza az él kitöredezése és törése, nem pedig a szokásos szerszámkopás a megszakított forgácsolás miatt.

Caizar és Fratila a Taguchi optimalizálási módszert alkalmazza a homlokmarás forgácsolási paramétereinek optimalizálására AIMg3 munkadarab alapanyag gyorsacél szerszámmal félsimító körülmények közötti megmunkálásánál, ahol a cél a legjobb felületi érdesség és a minimális energiafogyasztás elérése volt (Caizar és Fratila, 2011). A hagyományos elárasztásos hűtés mellett a vizsgálatok közé tartozott a minimális kenési mennyiség alkalmazása és a száraz marás. Megállapították, hogy a majdnem száraz technikák sikeresen alkalmazhatók anélkül, hogy befolyásolnák a felületi érdességet és a forgácsolóerőt.

Ghani és szerzőtársai ismertették a marási paraméterek optimalizálására alkalmazott Taguchi optimalizálási módszert, amelynél AISI H13 edzett acélt TiN bevonatú P10 keményfém lapkás szerszámmal munkáltak meg nagysebességű félsimító és simító marással (Ghani et al., 2004). A forgácsoló sebesség, az előtolás és a fogásmélység hatását elemezték ortogonális tömbbel, jel/zaj arányt és Pareto varianciaanalízist (ANOVA) alkalmaztak. Az eredmények elemzése azt mutatta, hogy az optimális kombináció a kicsi forgácsolóerő és a jó felületminőség érdekében a nagy forgácsoló sebesség, a kis előtolás és a kis fogásmélység.

Yalcin és szerzőtársai a forgácsolási paraméterek hatását mesterséges neurális hálózatok segítségével vizsgálták, amelyeket Taguchi L8 ortogonális modelljéből nyert kísérleti eredmények felhasználásával hoztak létre (Yalcin et al., 2013). A kísérleti eredményeket összehasonlították az előrejelzett eredményekkel. Ennek a modellnek az alkalmazásával más, korábban nem végrehajtott kísérletek kombinációit is meg lehetett jósolni.

Kumar és szerzőtársai bemutatták a Taguchi kísérleti tervezés és varianciaanalízis (ANOVA) alkalmazását a homlokmarás forgácsolási paramétereinek optimalizálására (Kumar et al., 2019). A teljes faktoriális kísérlettervezés 27 kísérlete helyett Taguchi L9 ortogonális tömbjének segítségével csak kilenc kísérletet kellett végrehajtani. Az ANOVA eredmények azt mutatták, hogy a fogásmélység és az előtolás a leginkább befolyásoló paraméterek a felületi érdesség és az anyagleválasztási sebesség tekintetében. A kísérleti eredmény és az előrejelzett eredmény különbsége jóval a számított konfidencia intervallumon belül volt.

Reddy és Rao azt vizsgálták, hogy a szerszámgeometria (radiális homlokszög és csúcssugár) és a forgácsolási feltételek (forgácsoló sebesség és előtolás) milyen hatással vannak a megmunkálási teljesítményre a közepes széntartalmú acél marása során (Reddy és Rao, 2005). Matematikai modelleket dolgoztak ki a felületi érdesség előrejelzésére válaszfelületi módszertan alkalmazásával a kísérleti eredmények alapján. Az optimalizálásra kiválasztott modellt validálták, a paramétereknek a felületi érdességre gyakorolt jelentőségét varianciaanalízissel állapították meg. Genetikai algoritmusok segítségével kísérleteket végeztek a felületi érdesség előrejelzési modelljének optimalizálására. Azt tapasztalták, hogy a forgácsoló sebesség, az előtolás, a radiális homlokszög és a csúcssugár paraméterek az elsődleges tényezők, amelyek befolyásolják a felületi érdességet a marás során. A modellnek a genetikai algoritmusokkal történő optimalizálása meglehetősen hasznos módszert eredményezett a megmunkálási paraméterek meghatározására a lehető legjobb felületminőség elérése érdekében.

Zhou és szerzőtársai egy többcélú forgácsolási paraméter optimalizálási modellt javasoltak, amely a folyamatidő és az anyagleválasztás fajlagos energiafogyasztásának minimalizálására összpontosított (Zhou et al., 2018). Figyelembe vették a kényszerfeltételeket, például a szerszám gép megmunkálási kapacitását, a szerszám élettartamát, az alkatrész felületi érdességét és a fel nem használt képlékeny deformációs energiát. Egy genetikusan algoritmus segítségével hozták létre az optimalizálási modellt, és elemezték a paraméterek hatását a gép energiafogyasztására.

Kundrák és szerzőtársai többcélú optimalizálást végeztek acél munkadarabok homlokmarására (Kundrák et al., 2019b). Az optimalizálási folyamat célja a termelékenység maximalizálása volt, amelyet az anyagleválasztási sebesség képvisel az alacsony energiafelhasználás és a szerszámkopás korlátai között, amit a forgácsolóerő összetevőinek minimalizálásával és a minimális felületi érdesség megkövetésével valósítottak meg. Két különböző optimalizálási technikát, a genetikusan algoritmust és tűzijáték algoritmust alkalmaztak és összehasonlították a hatékonyságukat. A folyamatparaméterek és a felületi érdesség mutatói (R_a , R_z) közötti összefüggést először regressziós modellekkel keresték, megállapították, hogy a másodrendű modellek a legmegfelelőbbek. Mindkét esetben az előtolást jelölték meg a legfontosabb tényezőként. Ezután az optimalizálási problémát egy olyan célfüggvény alkalmazásával határozták meg, amelynél a cél a forgácsolóerő és a felületminőségi mutatók minimalizálása, valamint az anyagleválasztási sebesség maximalizálása volt. Az algoritmusok a fenti célok alapján, a megszabott korlátozások mellett a lehető legnagyobb anyagleválasztási sebességet biztosították, kis forgácsolóerő érték és elfogadható felületi érdesség mellett.

Zarei és szerzőtársai a harmónia keresési algoritmus alkalmazását vizsgálták a több fogással elvégzett homlokmarás optimalizálásához (Zarei et al., 2009). A megmunkálási paraméterek optimális értéke, beleértve a fogások számát, a fogásmélységét, a sebességet és az előtolást, minimális összköltséget eredményez, figyelembe véve a technológiai korlátokat, például a megengedett sebességet, előtolást, felületkezelést, a szerszám élettartamát és a szerszám gép képességeit. Teljesítményét összehasonlították a genetikusan algoritmuséval. Az eredmények azt mutatták, hogy a harmónia keresési algoritmus az optimális megoldáshoz nagyobb pontossággal és hatékonysággal konvergált, mint a genetikusan algoritmus.

Razfar és szerzőtársai bemutatták az optimális forgácsolási paraméterek meghatározásához egy módszert, amellyel minimális felületi érdességet lehet elérni rozsdamentes acél homlokmarásánál (Razfar et al., 2010). Részecske-raj-optimalizálás alapú neurális hálózat felhasználásával egy olyan prediktív modellt hoztak létre, amely a kísérletek során gyűjtött adatokon alapul. Jó egyezést tapasztaltak az előrejelzett felületi érdesség értékek és az előre meghatározott optimális gépbeállítások alkalmazásával végzett kísérleti mérések során kapott értékek között. A kifejlesztett algoritmus hatékonyan használható a rozsdamentes acél homlokmarásakor az adott forgácsolási körülményeknél az optimális forgácsolási paraméterek értékének megtalálásához.

Pimenov és szerzőtársai az AISI 1045 acélból készült alkatrészek homlokmarásának optimális körülményeit elemezték (Pimenov et al., 2020). A megmunkált felület minősége, a forgácsoló szerszám elemeinek költsége, az energiafogyasztás, a forgácsoló szerszám kopása és az anyagleválasztási sebesség voltak a fő paraméterek ebben a vizsgálatban. Számos forgácsolási kísérlet eredményein többretegű regressziós analízist végeztek, és nemlineáris matematikai egyenleteket hoztak létre nagy determinációs együtthatóval. A fogankénti előtolás, a forgácsoló sebesség és a hátkopás hatását vették figyelembe a felületi érdességre (R_z), a forgácsolási teljesítményre, az anyagleválasztási teljesítményre és a szerszám élettartamra. A Grey relációanalízissel becsült összesített eredmények alapján megadták a hatékony gyártáshoz tartozó paramétereket, valamint az erőforrások (szerszámok) kímélésének optimális paramétereit.

Yan és Li egy súlyozott Grey relációanalízisen és válaszfelületi módszertanon alapuló többcélú optimalizálási módszert mutattak be, amelyet a marási folyamat forgácsolási paramétereinek optimalizálására alkalmaznak a fenntarthatóság, a termelési hatékonyság és a megmunkálási minőség közötti kompromisszumok értékelése érdekében (Yan és Li, 2013). Három célkitűzés, mint például a felületi érdesség, az anyagleválasztási sebesség és a forgácsolási energia, egyszerre optimalizálható. A kiértékelte paraméterek az orsó fordulatszám, előtolás, fogásmélység és fogásszélesség. A súlyozott Grey relációanalízis egy kvantitatív módszer, amelyet több válasz súlytényezőinek meghatározására javasoltak az elemzéshez. A súlyozott Grey relációanalízis és a válaszfelületi módszertan alapján meghatározták az optimális marási paramétereket, a kapott eredmények azt mutatták, hogy a fogásszélesség a leginkább befolyásoló paraméter. Taguchi tervezési módszerrel kísérleteket végeztek a javasolt optimalizálási módszer igazolására.

Nguyen és Trung a válaszfelület módszer szakaszait elemezték a C45 acél homlokmarásának optimalizálása során, PVD bevonatú lapkák használatával (Nguyen és Trung, 2020). A felületi érdességre leginkább a meghatározott előtolás volt hatással, ezt követte a forgácsolási sebesség hatása. A fogásmélység olyan paraméter volt, amely nem nagyon befolyásolta a felület érdességét. A központi kísérleteket hozzáadták a kezdeti kísérletek elvégzéséhez. A kísérleti folyamat utolsó szakasza a válaszfelület tervezési szakasza volt. Ennek a szakasznak a befejezése után válaszfelületként a felületi érdesség és a forgácsolási mód paramétere közötti kapcsolatot adták meg. Végül a Minitab 16 statisztikai szoftvert alkalmazták a forgácsolási paraméterek optimális értékeinek meghatározására.

5. Összefoglalás

Ez a cikk összefoglalja azokat a főbb kutatási eredményeket, amelyek a felületi érdességnek és az alakhibának a vizsgálatával, valamint a megmunkálási folyamat optimalizálásával kapcsolatban megjelentek a szakirodalomban a homlokmarás témakörében.

Irodalom

- [1] Diniz, A. E., Filho, J. C. (1999). Influence of the relative positions of tool and workpiece on tool life, tool wear and surface finish in the face milling process. *Wear*, 232, 67–75. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(99\)00159-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00159-3)
- [2] Felhő, C., Kundrák, J. (2012). Characterization of topography of cut surface based on theoretical roughness indexes. *Key Engineering Materials*, 496, 194–199. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.496.194>
- [3] Luejanda, S., Jirapattarasilp, K. (2013). The study of surface finish in face milling of stainless steel: AISI 304. *Advances in Materials Science and Engineering*, 650, 606–611. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.650.606>
- [4] Hricová, J., Náprstková, N. (2015). Surface roughness optimization in milling aluminium alloy by using the Taguchi's design of experiment. *Manufacturing Technology*, 15(4), 541–546. <https://doi.org/10.21062/ujep/x.2015/a/1213-2489/MT/15/4/541>
- [5] Karkalos, N. E., Galanis, N. I., Markopoulos, A. P. (2016). Surface roughness prediction for the milling of Ti-6Al-4V ELI alloy with the use of statistical and soft computing techniques. *Measurement*, 90, 25–35. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.04.039>
- [6] Kundrák, J., Felhő, C. (2016). 3D roughness parameters of surfaces face milled by special tools. *Manufacturing Technology*, 16(3), 532–538. <https://doi.org/10.21062/ujep/x.2016/a/1213-2489/MT/16/3/532>

- [7] Kundrák, J., Felhő, C. (2018). Investigation of the topography of face milled surfaces. *Materials Science Forum*, 919, 78–83. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.919.78>
- [8] Kundrák, J., Varga, G., Nagy, A., Makkai, T. (2018a). Examination of 2D and 3D surface roughness parameters of face milled aluminium surfaces. *Cutting & Tools in Technological Systems*, 88, 94–100.
- [9] Hernández-González, L. W., Pérez-Rodríguez, R., Quesada-Estrada, A. M., Dumitrescu, L. (2018). Effects of cutting parameters on surface roughness and hardness in milling of AISI 304 steel. *DYNA*, 85(205), 57–63. <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n205.64798>
- [10] Nagy, A., Kundrák, J. (2019). Investigation of surface roughness characteristics of face milling. *Cutting & Tools in Technological Systems*, 90(1), 63–72. <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2019.90.08>
- [11] Nagy, A. (2019). Homlokmarat felület érdessége az előtolás és a forgácsarány változtatásának hatására rombusz alakú lapka alkalmazásával. *Multidiszciplináris tudományok*, 9(2), 84–89. <https://doi.org/10.35925/j.multi.2019.2.12>
- [12] Kundrák, J., Nagy, A., Markopoulos, A. P., Karkalos, N. E., (2019a). Investigation of surface roughness on face milled parts with round insert in planes parallel to the feed at various cutting speeds. *Cutting & Tools in Technological Systems*, 91(1), 87–96. <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2019.91.09>
- [13] Nagy, A., Kundrák, J. (2020). Changes in the values of roughness parameters on face-milled steel surface. *Cutting & Tools in Technological Systems*, 92, 85–95. <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2020.92.10>
- [14] Kundrák, J., Nagy, A. (2020a). Experimental study on surface roughness of face milled parts with round insert at various feed rates. *Cutting & Tools in Technological Systems*, 92, 96–106. <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2020.92.11>
- [15] Kundrák, J., Nagy, A. (2020b). Influence of measurement settings on areal roughness with confocal chromatic sensor on face-milled surface. *Cutting & Tools in Technological Systems*, 93, 65–75. <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2020.93.08>
- [16] Kundrák, J., Makkai, T., Nagy, A., Emri, G. (2020). Roughness of aluminum surfaces face milled with a diamond tool. *Cutting & Tools in Technological Systems*, 92, 26–34. <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2020.92.04>
- [17] Nagy, A., Kundrák, J. (2021). Analysis of the change in roughness on a face-milled surface measured every 45° direction to the feed. *Cutting & Tools in Technological Systems*, 95, 29–36. <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2021.95.04>
- [18] Nagy, A. (2021a). A forgácsolóerő vizsgálata korrózióálló acél homlokmarásánál. *Multidiszciplináris tudományok*, 11(2), 207–212. <https://doi.org/10.35925/j.multi.2021.2.27>
- [19] Nagy, A. (2021b). Investigation of the effect of areal roughness measurement length on face milled surface topographies. *Cutting & Tools in Technological Systems*, 94, 60–69. <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2021.94.07>
- [20] Pimenov, D. Y., Hassui, A., Wojciechowski, S., Mia, M., Magri, A., Suyama, D., Bustillo, A., Krolczyk, G., Gupta, M. (2019). Effect of the relative position of the face milling tool towards the workpiece on machined surface roughness and milling dynamics. *Applied Sciences*, 9(5), 842. <https://doi.org/10.3390/app9050842>
- [21] Baek, D. K., Ko, T. J., Kim, H. S. (1997). A dynamic surface roughness model for face milling. *Precision Engineering*, 20(3), 171–178. [https://doi.org/10.1016/S0141-6359\(97\)00043-3](https://doi.org/10.1016/S0141-6359(97)00043-3)

- [22] Franco, P., Estrems, M., Faura, F. (2008). A study of back cutting surface finish from tool errors and machine tool deviations during face milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(1), 112–123. <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2007.07.001>
- [23] Yang, Y., Li, X. Jiang, P., Zhang, L. (2011). Prediction of surface roughness in end milling with gene expression programming. *Proceedings of the 41st International Conference on Computers & Industrial Engineering*, 441–446.
- [24] Tapoglou, N., Antoniadis, A. (2012). 3-Dimensional kinematics simulation of face milling. *Measurement*, 45(6), 1396–1405. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2012.03.026>
- [25] Ali Abotihien, M. H., Khidhir, B., Ansari, M. N. M., Mohamed, B. (2013). FEM to predict the effect of feed rate on surface roughness with cutting force during face milling of titanium alloy. *HBRC Journal*, 9(3), 263–269. <https://doi.org/10.1016/j.hbrj.2013.05.003>
- [26] Muñoz-Escalona, P., Maropoulos, P. G. (2014). A geometrical model for surface roughness prediction when face milling Al 7075-T7351 with square insert tools. *Journal of Manufacturing Systems*, 36, 216–223. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2014.06.011>
- [27] Felhő, C., Kundrák, J. (2014). Comparison of theoretical and real surface roughness in face milling with octagonal and circular inserts. *Key Engineering Materials*, 581, 360–365. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.581.360>
- [28] Felhő, C., Karpuschewski, B., Kundrák, J. (2015). Surface roughness modelling in face milling. *Procedia CIRP*, 31, 136–141. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.03.075>
- [29] Denkena, B., Hasselberg, E. (2015). Influence of the cutting tool compliance on the workpiece surface shape in face milling of workpiece compounds. *Procedia CIRP*, 31, 7–12. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.03.074>
- [30] Hadad, M., Ramezani, M. (2016). Modeling and analysis of a novel approach in machining and structuring of flat surfaces using face milling process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 105, 32–44. <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2016.03.005>
- [31] Wang, R., Wang, B., Barber, G. C., Gu, J., Schall, J. D. (2019). Models for prediction of surface roughness in a face milling process using triangular inserts. *Lubricants*, 7(1), 9. <https://doi.org/10.3390/lubricants7010009>
- [32] Felhő, C., Nagy, A., Kundrák, J. (2020). Effect of shape of cutting edge on face milled surface topography. In Gençyılmaz, M. G., Durakbasa, N. M. (Eds.), *Proceedings of the International Symposium for Production Research 2019* (pp. 525–534). Bécs, Ausztria, Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-31343-2_46
- [33] Schmitz, T. L., Couey, J., Marsh, E., Mauntler, N., Hughes, D. (2007). Runout effects in milling: Surface finish, surface location error, and stability. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(5), 841–851. <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2006.06.014>
- [34] Hassanpour, H., Sadeghi, M. H., Rasti, A., Shajari, S. (2015). Investigation of surface roughness, microhardness and white layer thickness in hard milling of AISI 4340 using minimum quantity lubrication. *Journal of Cleaner Production*, 120(1), 124–134. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.091>
- [35] Mikó, B., Beňo, J., Ižol, P., Maňková, I. (2011). Surface quality of sculpture surface in case of 3D milling. *8th International Tools Conference ITC 2011*, 261–266.
- [36] Ghoreishi, R., Roohi, A. H., Ghadikolaei, A. D. (2018). Analysis of the influence of cutting parameters on surface roughness and cutting forces in high speed face milling of Al/SiC MMC. *Materials Research Express*, 5(8), 086521. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aad164>

- [37] Gu, F., Melkote, S. N., Kapoor, S. G., DeVor, R. E. (1997). A model for the prediction of surface flatness in face milling. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 119(4A), 476–484. <https://doi.org/10.1115/1.2831177>
- [38] Varga, G., Kundrák, J. (2017). Effects of technological parameters on surface characteristics in face milling. *Solid State Phenomena*, 261, 285–292. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.261.285>
- [39] Sheth, S., George, P. M. (2016). Experimental investigation and prediction of flatness and surface roughness during face milling operation of WCB material. *Procedia Technology*, 23, 344–351. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.03.036>
- [40] Varga, G., Pásztor, I. (2012). Investigation of shape error of environmentally friendly way milled workpieces. *Proceedings of the Thirteenth International Conference on Tools (ICT 2012)*, 299–304.
- [41] Mikó, B. (2018). Measurement and evaluation of the flatness error of a milled plain surface. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 448, 012007. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/448/1/012007>
- [42] Ng, E.-G., Lee, D. W., Sharman, A. R. C., Dewes, R. C., Aspinwall, D. K., Vigneau, J. (2000). High speed ball nose end milling of Inconel 718. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 49(1), 41–46. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62892-3](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62892-3)
- [43] Schwenzer, M., Adams, O., Klocke, F., Stemmler, S., Abel, D. (2017). Model-based predictive force control in milling: determination of reference trajectory. *Production Engineering*, 11, 107–115. <https://doi.org/10.1007/s11740-017-0721-z>
- [44] Nath, C., Brooks, Z., Kurfess, T. R. (2015). Machinability study and process optimization in face milling of some super alloys with indexable copy face mill inserts. *Journal of Manufacturing Processes*, 20 (1), 88–97. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.09.006>
- [45] Kaya, E., Akyüz, B. (2017). Effects of cutting parameters on machinability characteristics of Ni-based superalloys: a review. *Open Engineering*, 7(1), 330–342. <https://doi.org/10.1515/eng-2017-0037>
- [46] Aykut, Ş., Kentli, A., Gülmez, S., Yazıcıoğlu O. (2012). Robust multiobjective optimization of cutting parameters in face milling. *Acta Polytechnica Hungarica*, 9(4), 85–100.
- [47] Kundrák, J., Markopoulos, A. P., Makkai, T., Karkalos, N. E. (2018b). Correlation between process parameters and cutting forces in the face milling of steel. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 9783319756769, 255–267. https://doi.org/10.1007/978-3-319-75677-6_21
- [48] Lin, T.-R. (2002). Optimisation technique for face milling stainless steel with multiple performance characteristics. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 19, 330–335. <https://doi.org/10.1007/s001700200021>
- [49] Bağcı, E., Aykut, Ş. (2014). The effects of tool position, coating and cutting parameters on forces, power, MRR and wear in face milling of Stellite 6. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39(11), 8135–8146. <https://doi.org/10.1007/s13369-014-1354-6>
- [50] Caizar, C., Fratila, D. (2011). Application of Taguchi method to selection of optimal lubrication and cutting conditions in face milling of AlMg3. *Journal of Cleaner Production*, 19(6–7), 640–645. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.12.007>
- [51] Ghani, J. A., Choudhury, I. A., Hassan, H. H. (2004). Application of Taguchi method in the optimization of end milling parameters. *Journal of Materials Processing Technology*, 145(1), 84–92. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00865-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00865-3)

- [52] Yalcin, U., Karaoglan, A. D., Korkut, I. (2013). Optimization of cutting parameters in face milling with neural networks and Taguchi based on cutting force, surface roughness and temperatures. *International Journal of Production Research*, 51(11), 3404–3414. <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.774482>
- [53] Kumar, S., Saravanan, I., Patnaik, L. (2019). Optimization of surface roughness and material removal rate in milling of AISI 1005 carbon steel using Taguchi approach. *Materials today: proceedings*, 22(3), 654–658. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.039>
- [54] Reddy, N. S. K., Rao, P. V. (2005). Selection of optimum tool geometry and cutting conditions using a surface roughness prediction model for end milling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 26, 1202–1210. <https://doi.org/10.1007/s00170-004-2110-y>
- [55] Zhou, L., Li, J., Fangyi, L., Mendis, G., Sutherland, J. W. (2018). Optimization parameters for energy efficiency in end milling. *Procedia CIRP*, 69, 312–317. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.005>
- [56] Kundrák, J., Markopoulos, A. P., Makkai, T., Karkalos, N. E., Nagy, A. (2019b). Multi-objective optimization study in face milling of steel. In Durakbasa, N. M., Gençyılmaz, M. G. (Eds.), *Proceedings of the International Symposium for Production Research 2018* (pp. 3–15). Cham, Svájç, Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-92267-6>
- [57] Zarei, O., Fesanghary, M., Farshi, B., Saffar, R. J., Razfar, M. R. (2009). Optimization of multi-pass face-milling via harmony search algorithm. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(5), 2386–2392. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.05.029>
- [58] Razfar, M. R., Asadnia, M., Haghshenas, M., Farahnakian, M. (2010). Optimum surface roughness prediction in face milling X20Cr13 using particle swarm optimization algorithm. *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part B - Journal of Engineering Manufacture*, 1(B11), 1–9. <https://doi.org/10.1243/09544054JEM1809>
- [59] Pimenov, D. Y., Abbas, A. T., Gupta, M. K., Erdakov, I. N., Soliman, M. S., El Rayes, M. M. (2020). Investigations of surface quality and energy consumption associated with costs and material removal rate during face milling of AISI 1045 steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107, 3511–3525. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05236-7>
- [60] Yan, J., Li, L. (2013). Multi-objective optimization of milling parameters – the trade-offs between energy, production rate and cutting quality. *Journal of Cleaner Production*, 52, 462–471. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.02.030>
- [61] Nguyen, H. S., Trung, D. D. (2020). Optimization of cutting parameters when surface milling with face milling tool according to the stages of response surface method. *Universal Journal of Mechanical Engineering*, 8(3), 135–141. <https://doi.org/10.13189/ujme.2020.080301>