

**MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR**



**HATÁROZOTT ÉLŰ SZERSZÁMMAL FORGÁCSOLT
FELÜLETEK TOPOGRÁFIÁJÁNAK INHOMOGENITÁSA**

PHD ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

Készítette:
Nagy Antal
okleveles gépészmérnök

**SÁLYI ISTVÁN GÉPÉSZETI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA
GÉPÉSZETI ANYAGTUDOMÁNY, GYÁRTÁSI RENDSZEREK ÉS FOLYAMATOK
TÉMATERÜLET
GYÁRTÁSI RENDSZEREK ÉS FOLYAMATOK TÉMACSOPORT**

Doktori Iskola Vezető:
Vadászné Prof. Dr. Bognár Gabriella
a műszaki tudomány doktora, egyetemi tanár

Témacsoport Vezető:
Dr. Maros Zsolt
egyetemi docens

Témavezető:
Prof. Dr. Kundrák János
a műszaki tudomány doktora, Professor Emeritus

**Miskolc
2025**

Tartalomjegyzék

Tézisfüzetben alkalmazott jelölések és rövidítések	3
1. Kutatási probléma bemutatása	4
1.1. Határozott élű szerszámmal forgácsolt felületek topográfiája és inhomogenitásuk	4
1.2. Az értekezés célkitűzései	6
1.3. A kutatási feladat megoldása	7
1.3.1. <i>Kísérleti feltételek</i>	8
1.3.2. <i>A felületi érdesség mérése</i>	8
1.3.3. <i>Az elméleti vizsgálatok módszere, menete</i>	9
2. Új tudományos eredmények, hasznosítási lehetőségek	10
2.1. Tézisek	10
2.2. A hasznosítás és a továbbfejlesztés lehetőségei	12
Az értekezés témájában megjelent saját publikációk	13
Irodalomjegyzék	15

Tézisfüzetben alkalmazott jelölések és rövidítések

a_e [mm] – fogásszélesség

a_p [mm] – fogásmélység

b_e [mm] – szerszámcsúcs fazetta szélessége

CAD – Computer-Aided Design = számítógéppel segített tervezés

D_{sz} [mm] – névleges szerszámtérő

f [mm/ford.] – előtolás

f_z [mm/ford.] – fogankénti előtolás

iC [mm] – szerszámlapka beleírható kör átmérője

R_a [μ m] – átlagos érdesség

R_k [μ m] – redukált magzóna magasság

R_p [μ m] – maximális csúcsmagasság

R_z [μ m] – egyenetlenség-magasság

r_e [mm] – szerszámcsúcssugár

S_a [μ m] – átlagos érdesség

S_k [μ m] – redukált magzóna magasság

S_p [μ m] – maximális csúcsmagasság

S_z [μ m] – maximális egyenetlenség-magasság

v_c [m/min] – forgácsolósebesség

α_o [$^\circ$] – szerszám ortogonál hátszög

γ_o [$^\circ$] – szerszám ortogonál homlokszög

κ_r [$^\circ$] – szerszám főél-elhelyezési szög

κ_r' [$^\circ$] – szerszám mellékél-elhelyezési szög

1. Kutatási probléma bemutatása

Az első fejezetben bemutatom a határozott élű szerszámmal forgácsolt felületek topográfiai jellegzetességeit és inhomogenitásukat. Az ide sorolt forgácsoló eljárások közül kiemeltem a homlokmarást, amely felület érdességének jellemzőit részletesen leírom. Az irodalomkutatás alapján kijelölöm a disszertáció célkitűzését.

1.1. Határozott élű szerszámmal forgácsolt felületek topográfiaja és inhomogenitásuk

A gyártási folyamatban a gépipari gyártmányok alkatrészeit az előírt pontossággal és felületminőséggel állítják elő, hogy a meghatározott strukturális, funkcionális és egyéb elvárt követelményeket a tervezett élettartamuk alatt teljesíteni tudják [1]. Az elérésükben kiemelt szerepű a felületeik geometriai jellemzőinek megfelelő kialakítása [2]. A topográfián különböző nagyságrendű, makro- és mikrogeometriai elemeket különböztetünk meg, vagyis alaki és hullámossági, valamint érdességi egyenetlenségeket [3].

A pontossági és felületminőségi előírások megmunkáló eljárásokkal teljesíthetők, melyek közül kiemelkedő a forgácsolás: precíz, hatékony és sokoldalú lehetőséget nyújt [4] [5]. A folyamatban egy szerszám a munkadarab anyagát szétválasztja, amelyen ennek során egy vagy több új megmunkált felület jön létre. A forgácsolás következtében a szerszámél(ek) egy sajátos mintázatot, textúrát ad(nak) a felületnek [6].

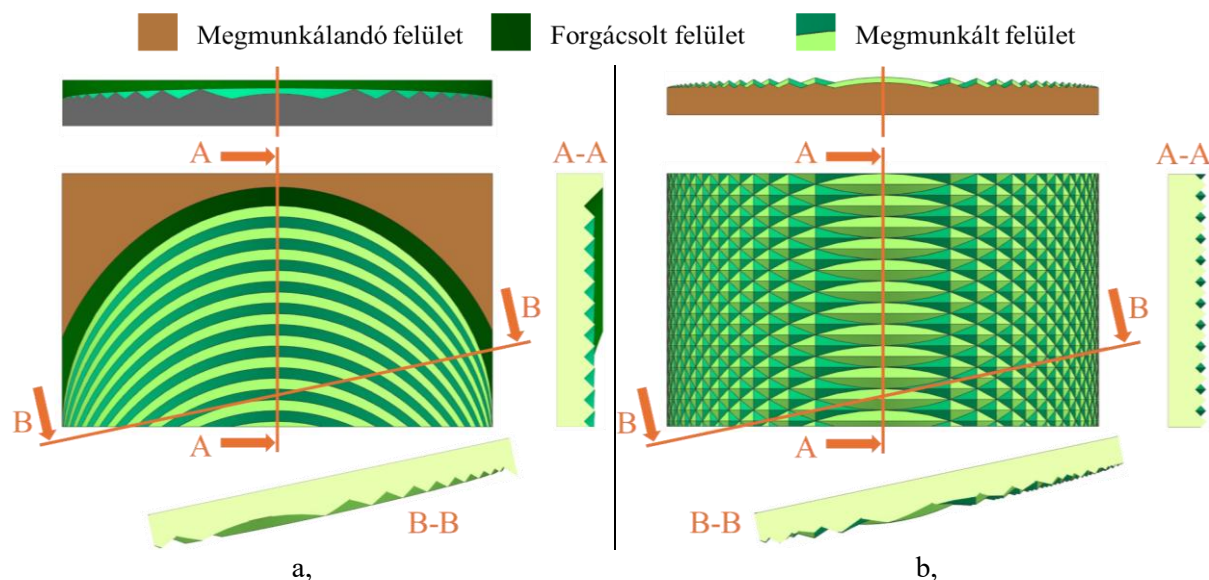
A határozott élű szerszámmal dolgozó eljárások jellemzően periodikus (adott irány(ok)ban ismétlődő, szabályos élnyomokkal előállított) topográfiát hoznak létre a szerszám egy vagy több élével. A mozgásviszonyok alapján különféle lenyomatok alakulnak ki a forgácsolt felületeken, amelyek hat alapvető típusba csoportosíthatók [3]. Az osztályozáshoz az elméleti topográfiát elemezzük, amit a szerszámél alapsíkbeli vetülete, a szerszám-munkadarab kinematikai viszonyai és az előtolás nagysága határoznak meg. A párhuzamos, merőleges (pl. esztergálással, fúrással, palástmarással, gyalulással), valamint koncentrikus lenyomattal (síkesztergálással) előállított felületek különböző részein a textúra és egy adott irányban meghatározott érdességi értékek azonosak. Ugyanakkor a szöget bezáró (kétféle forgácsolási irányban végzett gyalulással, véséssel vagy esztergálással), többirányú (homlokmarással, forgószerszámossal fűrészeléssel) és sugárirányú lenyomattal (körelőtolásos gyalulással, véséssel) kialakított felületeken a topográfia elemeinek elméleti magassága a különféle pontjaiban változik, valamely irányban felvett érdességi értékei jelentősen különböznek.

Egy határozott élű szerszámmal megmunkált felület topográfiaja inhomogén, ha a forgácsolás egy periódusában kialakult felületrészen felvett, egymást követő mérési helyeken az érdesség elméleti értékei változnak.

Az ide sorolható eljárások közül kiemeltem a homlokmarást, amelyen részletesen bemutatom a topográfia és inhomogenitásának jellemzőit. A felületi textúra előtolás irányban eltolt ciklois ívekből áll. Így ez irányban a marónyomok szabályosan ismétlődnek [7], és szimmetriasíknak tekintjük a szerszámtengely és az előtolási sebesség vektor által kifeszített síkot (1. ábra, A-A metszősík). Attól mindkét irányban távolodva az élnyomok sugárirányban csökkenő szélességűek és magasságúak, valamint a szomszédos barázdák közötti radiális irányú távolság is csökken (1a. ábra). A ciklois élnyomok miatt a textúra a szimmetriasíkra aszimmetrikus, amelynek nagysága rendszerint elhanyagolható az alkalmazott szerszám átmérőjéhez képest jelentősen kisebb beállított előtolás érték mellett ($D_{sz} \gg f$). Tehát a topográfián a szimmetriasíktól két irányban azonos távolságra kijelölt mérési helyek érdességének elméleti értékei kismértékű különbség mellett közel azonosak [8].

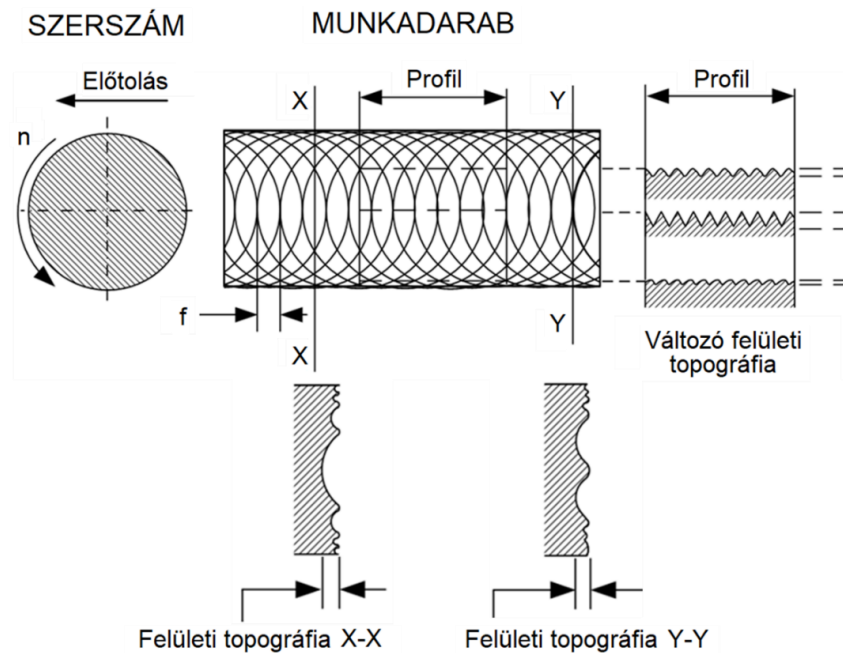
Homlokmarásnál előfordul, hogy a szerszámélek a mozgásviszonyok révén, illetve a szerszámtengely megmunkálendő felületre merőleges helyzete esetén, a szerszám egy fordulata alatt kétszer is forgácsolják a felületet, először előrejutó mozgásuk [9], majd a további előtolómozgásban a visszafordulásuk során is. Ekkor az ellenkező irányba ívelő ciklois görbék

metszik egymást. Ezáltal a textúra rombuszhoz hasonló kiemelkedésekből áll, amelyek a szimmetriasíktól távolodva egyre kisebbek, magasságuk csökken, de szélességük – előtolás irányban mérve – azonos marad (1b. ábra) [10]. A kettős lenyomatú topográfia ismétlődő jellege megmarad előtolás irányban, de különböző helyeken (és eltérő irányokban) végzett mérések jelentősen változó profilokhoz, felületelemekhez vezetnek (lásd a 2. ábrán az X–X és az Y–Y síkban metszett profilokat) [7]. A másodlagos anyagleválasztás hatására a topográfián az érdesség magasságának kisebb értékei mérhetők [8]. A csökkenés mértéke függ az előre- és a visszafutó élnyomok metszésének sajátosságaitól.



1. ábra: Egyszeres (a) és kettős (b) élnyommal kialakított elméleti homlokmart topográfia (A–A: szimmetriasík)

Mindezek alapján megállapítható, hogy a homlokmart felületi topográfia komplex és érdessége jelentősen eltérő lehet annak különböző helyein vizsgálva [8] [9] [11]. A fejezetben bemutatott inhomogén topográfiák jellemzőit teljeskörűen csak több, tudatosan megválasztott helyen végzett méréssel állapíthatjuk meg. Ugyanakkor, a magyar és a nemzetközi szakirodalomban viszonylag kevés számú publikációban foglalkoztak a homlokmart felület topográfiájának átfogó elemzésével. Chuchala és mtsai. a mart felületeken 5 felületelemet mértek meg, a szimmetriasíkokban és arra tükrözve 2-2 másik helyen. A fogásmélység változtatásának hatása mellett a felületrészek érdességi eredményeit összehasonlítva elemezték, a szerszámél-munkadarab mozgásvizonyok által meghatározott ellen-, egyenirányú felületrész, valamint a szimmetriasík környezete szerint [12]. Varga és Kundrák figyelembe vették a kinematikai viszonyok, így a szerszámél pályája által alkotott eltérő topográfiai részeket a mart felületen, aminek elemzéséhez 5×5 helyen végeztek mérést [13]. Megállapították, ahogyan Zhenyu és mtsai. is [14], hogy a maximális érdességi értékek a szimmetriasíkokban mérhetők, és attól távolodva más párhuzamos síkokban az értékek egyre csökkennek. Ezzel összhangban változtak az érdességi profilgörbék magasságai az előbbi síkokban. Továbbá a valós felületen a szerszámél belépési oldalán nagyobb értékeket tapasztaltak. Felhő és Kundrák növekvő előtolással mart felületek elméleti és valós érdességét vizsgálták három párhuzamos mérési síkban (a szimmetriasíkokban és attól két oldalt azonos távolságokban) [15]. Rámutattak a topográfia különböző részein az érdességi értékek eltéréseire, melyek nagyobb előtolásoknál jelentős mértékűek.



2. ábra: Kettős élnyomokkal homlokmart felületen felvett profilok különböző helyeken és irányokban [7]

Összegezve megállapítható, hogy az érdesség változásának törvényszerűsége nincs átfogó mértékben meghatározva, viszont az illesztett felületek működési tulajdonságait jelentősen befolyásolhatja. Emiatt tűzttem ki célul a forgácsolt felületek inhomogenitásának vizsgálatát, a jellegzetességeinek feltárását.

1.2. Az értekezés célkitűzései

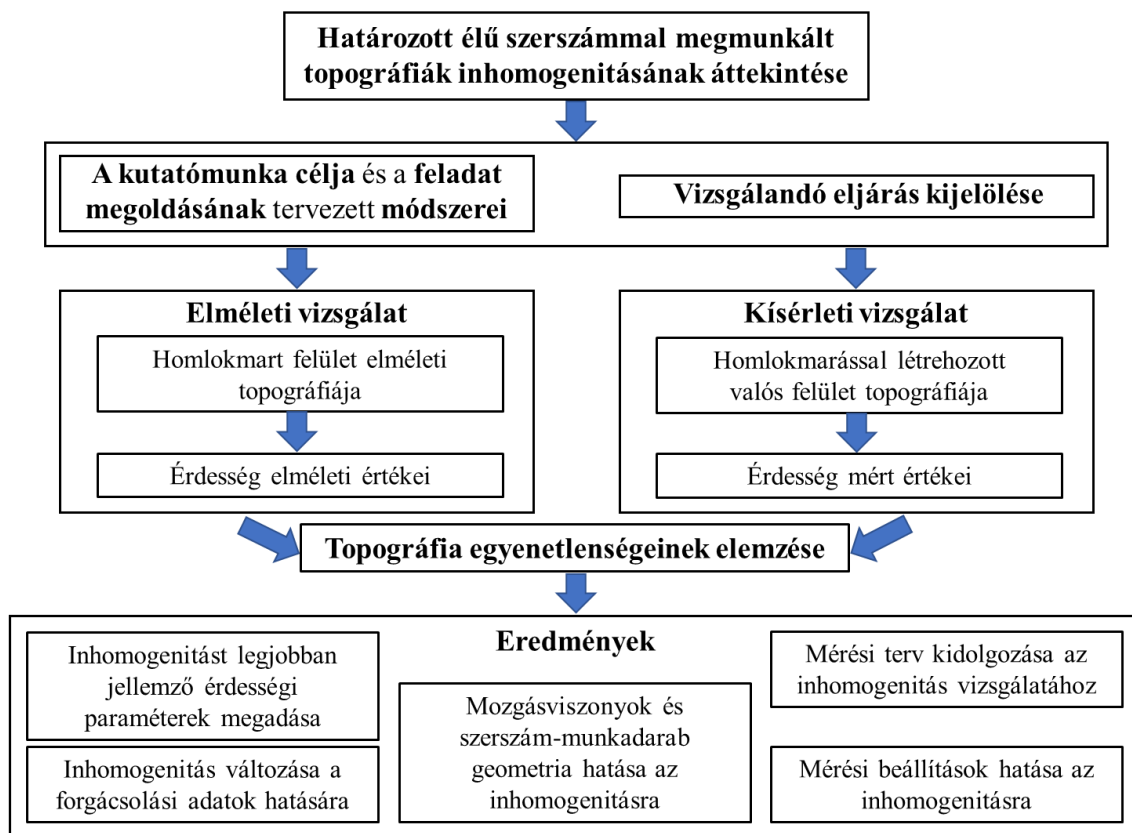
A kutatómunkám célja a határozott élű szerszámmal megmunkált felületek topográfiájának és az érdességük változásának elméleti és kísérleti vizsgálata, az inhomogenitás nagyságának és jellegének, illetve összefüggéseinek feltárása. A kutatást az alábbi lépésekben valósítom meg:

- A határozott élű szerszámmal előállított felületek topográfiáinak elméleti áttekintése, a lenyomatuk elemzése.
- A megmunkált felületi topográfiák csoportosítása a lenyomat fajta szerint és az inhomogén topográfiát létrehozó megmunkálási módok megnevezése. Azon eljárás kijelölése, amellyel a befejező megmunkálással készített felületen jelentős érdességi eltérés várható.
- A kijelölt eljárással, homlokmarással létrehozott felületi topográfiák inhomogenitásának bemutatása és elméleti jellemzése. A vizsgált paraméterek hatásainak bemutatása.
- Az inhomogenitást a legnagyobb mértékű eltéréssel és az elméleti topográfián az értékek viszonylagos megoszlási jellemzőit leginkább kifejező topográfiai paraméter(ek) megadása.
- A szerszám és a munkadarab mozgások hatásának vizsgálata a felületi textúrára és annak érdességi eltéréseire. Az egyszeres és a kettős marónyomokkal rendelkező homlokmart topográfiák inhomogenitásának elméleti – kinematikai viszonyokat és szerszám élgeometriát figyelembevéve – és kísérleti összehasonlító elemzése, nagyságának és jellegének feltárása. A mérési irány befolyásának megállapítása a vizsgált topográfiai paraméterek értékeire.
- A marószerszám és munkadarab geometria hatásának vizsgálata a homlokmart topográfia inhomogenitásának mértékére és jellegére, összefüggések megadása.

Különböző szerszám élgeometriával előállított topográfiák összehasonlító elemzése, inhomogenitásuk megállapítása és rangsorolása.

- A vizsgált felületek érdességi inhomogenitásának elemzése a fogankénti előtolás és a forgácsolósebesség változtatásának hatására.
- A mérési beállítások, a mérési helyek számának és a felületen való elhelyezkedésük hatásának elemzése az inhomogenitás nagyságára. Az eredmények alapján érdességmérési terv meghatározása homlokmaráshoz, az eljárás sajátosságait figyelembevéve.

A topográfiai inhomogenitás vizsgálatának lépéseit a 3. ábra tartalmazza. Várható eredmény a vizsgált eljárással előállított felületeken az inhomogenitás jellemzőinek meghatározása, illetve a beállított forgácsolási paraméterek, a szerszám és munkadarab geometria és az érdességi eltérések összefüggéseinek feltárása. Ezáltal a megmunkált felületek funkcionális elvárásaihoz jobban igazodó alkatrészek tervezése és gyártása válik lehetővé.



3. ábra: A kutatómunka menete

1.3. A kutatási feladat megoldása

A homlokmart felület topográfiai inhomogenitásának vizsgálatához kísérleteket végeztem a Miskolci Egyetem Gyártástudományi Intézet gép- és eszközparkjával. Először előkísérleteket végeztem el, amelyek eredményei alapján kijelöltem a topográfiai inhomogenitás vizsgálatához elemzendő érdességi paramétereket. Majd a kiválasztott forgácsolási paraméterekkel megmunkáltam felületeket, ezt követően megmértem azok 2D-s és 3D-s érdességét. A következőkben bemutatom a kísérleti feltételeket, az érdességmérés eszközeit és menetét.

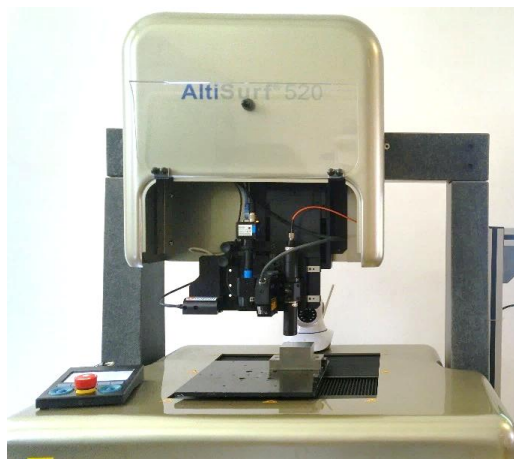
1.3.1. Kísérleti feltételek

A megmunkálások egy PerfectJet MCV-M8 típusú függőleges orsójú CNC marógépen valósultak meg. A normalizált állapotú C45 minőségű ötvöztelen acél (1.0503) munkadarabokon forgácsoltam síkfelületeket, amelyek szélessége 58 mm és 100 mm, hossza 50 mm. A homlokmarás hűtés-kenés nélkül történt. A vizsgálatokban négyféle élgeometriájú lapkás, többféle névleges átmérőjű szerszámokat alkalmaztam. A forgácsolásban használt marófejekre 1-1 lapkát szereltem, ezáltal a topográfia kialakulását nem befolyásolta a szerszámélek ütése. A kísérletek során a felületeket új, éles szerszámélekkel munkáltam meg. A beállított forgácsolási adatok (v_c forgácsolósebesség, f_z fogankénti előtolás, a_p axiális fogásmélység és a_e fogásszélesség) kijelölt bázisértékeit állítottam be, és a vizsgált paraméter hatásának elemzésénél az alapértéktől azonos nagyságú különbséggel kisebb és nagyobb értékeket vettem fel. A forgácsolási adatok vizsgált tartományai: $v_c = 200 - 400$ m/min, $f_z = 0,2 - 0,6$ mm/ford., $a_p = 0,4$ mm, $a_e = 31,5 - 100$ mm.

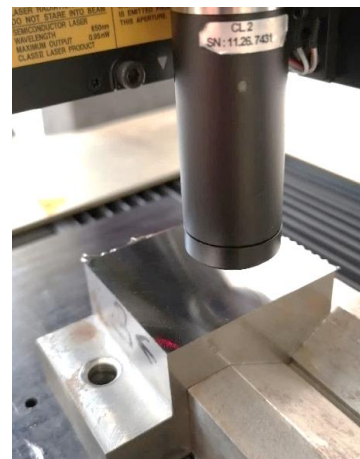
Forgácsolás során a szerszámtengelyhez a mart felületek szimmetriasíkját, valamint 1-1 szélét igazítottam merőleges helyzetben. Valamint a munkadarab előtolómozgásának úthossza meghatározta a kialakult szerszámélnyomokat. Annak közelítése a szerszámhoz és előtolása a szerszámtengely vonaláig egyszeres, csak előrefutó élnyomokat, a további lineáris mozgással – az élek visszafutásuk során is karcolva a felületet – kettős marónyomot generált.

1.3.2. A felületi érdesség mérése

A megmunkált felületeken az érdességméréseket egy AltiSurf 520 háromdimenziós felületi topográfia mérő berendezésen végeztem el (4a. ábra). Azon egy CL2 konfokális kromatikus szenzort használtam egy MG140 nagyítóval ellátva (4b. ábra). A méréseket az AltiMap Premium v6.2. szoftverben értékeltem ki.



a,



b,

4. ábra: A topográfia mérő berendezés (a), a próbadarab és az érdességmérő szenzor (b)

A mérések és a kiértékelések során az ISO 4287 [16], az ISO 4288 [17] és az ISO 25178 [18] szabvány előírásait vettem figyelembe és tartottam be. Az eltérés elemzéséhez a felületeken a szimmetriasíokban és attól azonos távolságban lévő párhuzamos mérési síkokban vagy attól megadott szöveget bezáró irányban is felvettem mérési helyeket. A 2D-s érdességmérések és kiértékelések során a szabvány [17] szerint 0,2 – 0,4 mm/ford. fogankénti előtolás között 4 mm kiértékelési- és 0,8 mm, 0,6 mm/ford. fogankénti előtolás esetén 12,5 mm kiértékelési- és 2,5 mm vágási hosszt állítottam be. A topográfia 3D-s elemzéséhez a kijelölt mérési helyeken 4 mm x 4 mm nagyságú felületelemeket értékeltem ki 0,8 mm vágási hossz alkalmazása mellett.

1.3.3. Az elméleti vizsgálatok módszere, menete

Az elméleti vizsgálatához Felhő munkásságát vettem alapul. Ő bázisnak az elméleti érdességet tekintette az általa kidolgozott CAD modell segítségével [19], amelyet csak a szerszám élgeometria és a kinematikai viszonyok határoznak meg [20]. Ezáltal megállapította analitikai úton a mart topográfia érdességi mérőszámainak elméleti értékeit [19]. Egyúttal kialakította a kívánt érdességi értékek becslésének és tervezhetőségének lehetőségét [9]. Kundrákkal együttműködve rámutattak arra, hogy a felületen különböző irányokban és helyeken a mozgásviszonyok által egymástól eltérő érdességi értékek jönnek létre [15]. Ismertették az elméleti 2D-s és 3D-s paraméterek és a valóságos érdességi értékek közötti eltéréseket, illetve összefüggéseket határozott élű szerszamos megmunkálásra [9].

Vizsgáltam a forgácsolási adatok bázisértékeivel megmunkált felületek elméleti topográfiáit. Elkészítettem ezen felületek CAD modelljeit, ahol figyelembe vettem a szerszámél alapsíkbeli vetületét, a szerszám-munkadarab kinematikai viszonyait – a szerszámél által bejárt ciklois pályát – és az előtolás nagyságát. A topográfiai modellek érdességét kiértékeltem a Felhő által megalkotott illesztőprogram [20] segítségével, a kijelölt mérőszámok értékeivel. Meghatároztam a vizsgált topográfia több elméleti jellemzőjét: az érdességének változási jellegét, valamint az elemzett érdességi mérőszámok értékeit és azok helyfüggő változásait.

2. Új tudományos eredmények, hasznosítási lehetőségek

A homlokmarást gyakran alkalmazzák az iparban befejező megmunkálásként is síkfelületek nagy termelékenységu megmunkálására. Ennek ellenére a felületi topográfia változatosságát a legtöbb esetben nem veszik figyelembe, amely hatással lehet annak működési tulajdonságaira. A kutatómunkámmal a felületi inhomogenitás eddig kellő mélységben nem kidolgozott, a célkitűzésekben megfogalmazott kérdéseinek megválaszolását oldottam meg. Az ezekből levonható fontosabb következtetéseket az alábbi tézisekben foglalom össze.

2.1. Tézisek

- T1. Definiáltam az inhomogenitást. A szerszám és munkadarab mozgásviszonyai és viszonylagos helyzetük alapján meghatároztam, mely határozott élű szerszámmal működő eljárásoknál jön létre inhomogén topográfia. Ez alapján kidolgoztam egy mérési tervet a homlokmarat felületi topográfia inhomogenitásának elemzéséhez. [N12, N14, N17]

(Alkalmazott szerszám: Tungaloy T2845 PM 063.05Z5W marófejben 1 db OFEX 05T3AE nyolcszög alakú forgácsolólapka, $D_{sz} = 63 \text{ mm}$, $\kappa_r = 45^\circ$, $\gamma_o = 25^\circ$, $\alpha_o = 7^\circ$, $r_e = 0,4 \text{ mm}$. Minden beállításnál új szerszámélek. Beállított forgácsolási adatok: $f_z = 0,4 \text{ mm/ford.}$, $v_c = 300 \text{ m/min}$, $a_p = 0,4 \text{ mm}$, $a_e = 63 \text{ mm}$. Vizsgált érdességi paraméterek: R_a , R_z , R_p , R_k , S_a , S_z , S_p , S_k .)

- T2. Egyszeres lenyomattal kialakított homlokmarat síkfelületeken a szimmetriasíkra tükrözött mérési helyek értékei között a különbségek kismértékűek (20%-on belül). Az ellenirányban marat felületeken mért értékek terjedelme legfeljebb 61%-os, amely az egyenirányban marat felületeken közel azonos, míg a szimmetrikus beállítással forgácsolt felületen maximum 78%-os. Az előtolás irányú mérési síkok közül a szimmetriasíkokban mért értékek különbsége kisebb (maximum 20,5%-os), mint egy bármilyen másik helyzetű párhuzamos síkban. Ennek mértéke a magassági R_a , R_z , R_p , valamint S_a , S_z , S_p mérőszámoknál a 41%-ot, a funkcionális R_k és S_k paramétereknél az 53%-ot is elérheti. [N18, N19]

(Alkalmazott szerszámok: Canela 074890063 marófejben 1 db SEKN 1203 AFTN négyzet alakú forgácsolólapka, $D_{sz} = 63 \text{ mm}$, $\kappa_r = 45^\circ$, $\gamma_o = 0^\circ$; $\alpha_o = 20^\circ$; $b_e = 0,85 \times 45^\circ$; ATORN 10612120 marófejben 1 db RCKX 1606-MO-TR kör alakú forgácsolólapka, $D_{sz} = 80 \text{ mm}$, $iC = 16 \text{ mm}$, $\gamma_o = 23^\circ$, $\alpha_o = 7^\circ$. Minden beállításnál új szerszámélek. Munkadarab anyaga: normalizált állapotú, C45 minőségű ötvözetlen acél, 180 HB keménységű. Beállított forgácsolási adatok: $f_z = 0,2 \text{ mm/ford.}$ és $0,4 \text{ mm/ford.}$, $v_c = 300 \text{ m/min}$, $a_p = 0,4 \text{ mm}$, $a_e = 31,5 \text{ mm}$ és 58 mm . Vizsgált érdességi paraméterek: R_a , R_z , R_p , R_k , S_a , S_z , S_p , S_k .)

- T3. Kettős élnyomokkal előállított homlokmarat felületen, a másodlagos anyagleválasztás hatására a vizsgált érdességi mérőszámok értékei csökkentek 15–40%-kal, ugyanakkor közöttük a különbségek megnövekedtek. A magassági (R_a , R_z , R_p és S_a , S_z , S_p) és funkcionális (R_k és S_k) paraméterek terjedelme jelentős az előtolás irányú mérési síkokban (legfeljebb 75%, illetve 99%), valamint az eltérő mérési síkokban mért értékek között is (maximum 104%, valamint 119%). [N11, N20, N25, N28]

(Alkalmazott szerszámok: Canela 074890063 marófejben 1 db SEKN 1203 AFTN négyzet alakú forgácsolólapka, $D_{sz} = 63 \text{ mm}$, $\kappa_r = 45^\circ$, $\gamma_o = 0^\circ$; $\alpha_o = 20^\circ$; $b_e = 0,85 \times 45^\circ$; ATORN 10612120 marófejben 1 db RCKX 1606-MO-TR kör alakú forgácsolólapka, $D_{sz} = 80 \text{ mm}$, $iC = 16 \text{ mm}$, $\gamma_o = 23^\circ$, $\alpha_o = 7^\circ$. Minden beállításnál új szerszámélek. Munkadarab anyaga: normalizált állapotú, C45 minőségű ötvözetlen acél, 180 HB

keménységű. Beállított forgácsolási adatok: $f_z = 0,2 \text{ mm/ford.}$ és $0,4 \text{ mm/ford.}$, $v_c = 200 \text{ m/min}$ és 300 m/min , $a_p = 0,4 \text{ mm}$, $a_e = 58 \text{ mm}$. Vizsgált érdességi paraméterek: R_a , R_z , R_p , R_k , S_a , S_z , S_p , S_k .)

- T4. Homlokmarással, egyszeres élnyomokkal létrehozott felületen az előtolás irányával szöget bezáró irányban a 2D-s érdességi értékek terjedelme 30° -ig kismértékű (12% alatti), míg ennél nagyobb, maximum 90° -os irányszög beállítása esetén jelentős (a magassági R_a , R_z , R_p és S_a , S_z , S_p mérőszámoknál maximum 108%-os, a funkcionális R_k és S_k paraméterek esetén legfeljebb 126%-os). Az előtolási sebesség vektorral megadott szögben álló mérési irányra illesztett több, eltolt párhuzamos síkkal a teljes felületre jellemző értékek mérhetők. A topográfia 3D-s érdességi tulajdonságaira a mérési irány változtatásának nincs hatása. [N15, N21, N22, N24]

(Alkalmazott szerszám: ATORN 10612120 marófejben 1 db OCKX 0606-AD-TR nyolcszög alakú forgácsolólapka, $D_{sz} = 80 \text{ mm}$, $\kappa_r = 43^\circ$, $\gamma_o = 25^\circ$, $\alpha_o = 7^\circ$, $r_e = 0,5 \text{ mm}$. Minden beállításnál új szerszámélek. Munkadarab anyaga: normalizált állapotú, C45 minőségű ötvözetlen acél, 180 HB keménységű. Beállított forgácsolási adatok: $f_z = 0,4 \text{ mm/ford.}$, $v_c = 300 \text{ m/min}$, $a_p = 0,4 \text{ mm}$, $a_e = 58 \text{ mm}$. Vizsgált érdességi paraméterek: R_a , R_z , R_p , R_k , S_a , S_z , S_p , S_k .)

- T5. A szerszám és a munkadarab geometriai jellemzői az alábbiak szerint hatnak az inhomogenitásra.

- A marószerszám-átmérő növelésével – azonos nagyságú felületeknél – az érdességi értékek terjedelme maximum 70%-ról 19%-ra csökkent. Ugyanakkor, azonos átfogási szög esetén a terjedelem 20% alatt változik.
- A fogásszélesség növelésére – más forgácsolási vagy mérési paraméter változtatása nélkül – az inhomogenitás mértéke közel azonos.
- Különböző élgeometriájú szerszámmal előállított homlokmarat felületeket az inhomogenitás mértéke alapján rangsoroltam: növekvő sorrendben a paralelogramma alakú (24–32%-os), a nyolcszög (38–51%-os), a négyzet alakú fazettás (37–74%-os), és a körlekés szerszám (31–73%-os). [N10]

(Alkalmazott szerszámok: ATORN 10612120 marófejben 1 db RCKX 1606-MO-TR kör alakú forgácsolólapka, $D_{sz} = 80 \text{ mm}$, $iC = 16 \text{ mm}$, $\gamma_o = 23^\circ$, $\alpha_o = 7^\circ$; Tungaloy T2845 PM 050.05Z4, T2845 PM 063.05Z5W, T2845 PM 100.05Z8 marófejben 1 db OFEX 05T3AE nyolcszög alakú forgácsolólapka, $D_{sz} = 50 \text{ mm}$, 63 mm , 100 mm , $\kappa_r = 45^\circ$, $\gamma_o = 25^\circ$, $\alpha_o = 7^\circ$, $r_e = 0,4 \text{ mm}$; Sandvik R252.44-080027-15M marófejben 1 db R215.44-15T308M-WL paralelogramma alakú forgácsolólapka, $\kappa_r = 90^\circ$, $\kappa'_r = 3^\circ$, $\gamma_o = 0^\circ$, $\alpha_o = 11^\circ$, $r_e = 0,8 \text{ mm}$; Canela 074890063 marófejben 1 db SEKN 1203 AFTN négyzet alakú forgácsolólapka, $D_{sz} = 63 \text{ mm}$, $\kappa_r = 45^\circ$, $\gamma_o = 0^\circ$, $\alpha_o = 20^\circ$, $b_e = 0,85 \times 45^\circ$. Minden beállításnál új szerszámélek. Munkadarab anyaga: normalizált állapotú, C45 minőségű ötvözetlen acél, 180 HB keménységű. Beállított forgácsolási adatok: $f_z = 0,4 \text{ mm/ford.}$, $v_c = 300 \text{ m/min}$, $a_p = 0,4 \text{ mm}$, $a_e = 50 \text{ mm}$, 58 mm , 63 mm és 100 mm , $\varphi_1 = \varphi_2 = 30^\circ$, 60° és 90° . Vizsgált érdességi paraméterek: R_a , R_z , R_p , R_k .)

- T6. Az előtolás és a forgácsolósebesség értékeinek változtatása – a vizsgált tartományokban – jelentős hatással van a topográfia inhomogenitására. A fogankénti előtolás érték növelésére a homlokmarat felület inhomogenitása a magassági R_a , R_z , R_p és S_a , S_z , S_p mérőszámoknál 51%-ról 108%-ra, a funkcionális R_k és S_k paraméterek esetén 49%-ról 75%-ra nőtt. A forgácsolósebesség értékének növelésével a topográfia inhomogenitásának mértéke a magassági paramétereknél 77%-ról 51%-ra csökkent, a funkcionális mérőszámok esetében az eltérés mértéke – irányfüggően – 67%-os. [N6, N8, N9, N13]

(Alkalmazott szerszámok: Canela 074890063 marófejben 1 db SEKN 1203 AFTN négyzet alakú forgácsolólapka, $D_{sz} = 63 \text{ mm}$, $\kappa_r = 45^\circ$, $\gamma_o = 0^\circ$; $\alpha_o = 20^\circ$; $b_e = 0,85 \times 45^\circ$; ATORN 10612120 marófejben 1 db RCKX 1606-MO-TR kör alakú forgácsolólapka, $D_{sz} = 80 \text{ mm}$, $iC = 16 \text{ mm}$, $\gamma_o = 23^\circ$, $\alpha_o = 7^\circ$. Minden beállításnál új szerszámélek. Munkadarab anyaga: normalizált állapotú, C45 minőségű ötvözetlen acél, 180 HB keménységű. Beállított forgácsolási adatok: $f_z = 0,2 \text{ mm/ford.}$, $0,4 \text{ mm/ford.}$ és $0,6 \text{ mm/ford.}$, $v_c = 200 \text{ m/min}$, 300 m/min és 400 m/min , $a_p = 0,4 \text{ mm}$, $a_e = 58 \text{ mm}$. Vizsgált érdességi paraméterek: R_a , R_z , R_p , R_k .)

2.2. A hasznosítás és a továbbfejlesztés lehetőségei

Az értekezésben bemutatott vizsgálati módszer alkalmazásával a felület topográfiai sajátosságai az eddigi kutatási eredményektől részletesebben felírható és inhomogenitásuk pontosabban megadható az elemzett mérőszámok alapján. Ezáltal a megmunkált felületekre vonatkozó funkcionális követelményeknek jobban megfelelő alkatrészek tervezhetők és állíthatók elő. Ennek különös jelentőségét az adja, hogy folyamatosan növekszik a legyártott alkatrészek között a precíziós alkatrészek száma.

A disszertációm eredményei több irányban is továbbfejleszthetők. Ilyen pl. a homlokmarot felület topográfiai jellemzőinek – például az élnyomok magasságának és radiális szélességének változása, valamint az élnyomok metszésének jellegzetességei – további feltárása és az alkatrész megmunkálásának tervezéséhez adatbázis létrehozása. Emellett vizsgálni kívánom a forgácsolás során alkalmazott – az értekezésben nem elemzett – beállítások (például a hűtőkenő folyadék használata, a szerszámtengely döntése, illetve az oldalirányú fogásvétel) módosításának inhomogenitásra gyakorolt hatását.

A kutatómunka következő fázisában tervezem az inhomogenitási és a funkcionális paraméterek szorosabb kapcsolatának feltárását – tribológiai vizsgálatokkal együtt. A továbbiakban tervezem bonyolultabb geometriájú szerszámokkal (pl. sarokmaróval, gömbvégű maróval) létrehozott topográfiák jellemzését, valamint az elemzési módszer kiterjesztését más határozott élű szerszámmal dolgozó eljárásokra is.

Az értekezés témájában megjelent saját publikációk

- [N1] J. Kunderak, T. Makkai, I. Deszpoth, A. Nagy, „Investigation of cutting force in face milling,” *Cutting & Tools in Technological System*, vol. 87, pp. 118-125, 2017.
- [N2] J. Kunderak, Gy. Varga, A. Nagy, T. Makkai, „Examination of 2D and 3D surface roughness parameters of face milled aluminium surfaces,” *Cutting & Tools in Technological System*, vol. 88, pp. 94-100, 2018.
- [N3] J. Kunderak, A.P. Markopoulos, T. Makkai, I. Deszpoth, A. Nagy, „Analysis of the effect of feed on chip size ratio and cutting forces in face milling for various cutting speeds,” *Manufacturing Technology*, vol. 18, no. 3, pp. 431-438, 2018. (Scopus, Q2)
- [N4] J. Kunderak, A.P. Markopoulos, T. Makkai, A. Nagy, „Theoretical and experimental analysis of the effect of chip size ratio on cutting forces in face milling of steel,” *International Journal of Mechanical Engineering*, vol. 3, pp. 29-35, 2018.
- [N5] J. Kunderak, A.P. Markopoulos, T. Makkai, A. Nagy, „Correlation between chip ratio and specific forces with increasing feed per tooth and cutting speed in face milling of steel,” *WSEAS Transactions of Environment and Development*, vol. 14, pp. 338-346, 2018. (Scopus, Q4)
- [N6] A. Nagy, J. Kunderak, „Effect of cutting speed on surface roughness: face milling of steel with a parallelogram insert,” in *MultiScience - XXXIII. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference*, Miskolc-Egyetemváros, Magyarország, Miskolci Egyetem, 2019, p. D1-4.
- [N7] J. Kunderak, A.P. Markopoulos, T. Makkai, N.E. Karkalos, A. Nagy, „Multi-objective optimization study in face milling of steel,” in *ISPR 2018, Proceedings of the International Symposium for Production Research 2018*, Springer, 2019, pp. 3-15.
- [N8] A. Nagy, J. Kunderak, „Investigation of surface roughness characteristics of face milling,” *Cutting & Tools in Technological System*, vol. 90, pp. 63-72, 2019.
- [N9] J. Kunderak, A. Nagy, A.P. Markopoulos, N.E. Karkalos, „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 System*, vol. 91, pp. 87-96, 2019.
- [N10] C. Felhő, A. Nagy, J. Kunderak, „Effect of shape of cutting edge on face milled surface topography,” in *Proceedings of the International Symposium for Production Research 2019*, Springer International Publishing, Wien, 2020, pp. 525-534.
- [N11] A. Nagy, J. Kunderak, „Changes in the values of the roughness parameters on the face milled steel surface,” *Cutting & Tools in Technological System*, vol. 92, pp. 85-95, 2020.
- [N12] A. Nagy, „Influence of measurement settings on areal roughness with confocal chromatic sensor on face-milled surface”, *Cutting & Tools in Technological System*, vol. 93, pp. 65-75, 2020.
- [N13] J. Kunderak, A. Nagy, A.P. Markopoulos, N.E. Karkalos, D. Skondras-Giousios, „Experimental study on surface roughness of face milled parts with round insert at various feed rates,” *Cutting & Tools in Technological System*, vol. 92, pp. 96-106, 2020.
- [N14] A. Nagy, „Investigation of the effect of areal roughness measurement length on face milled surface topographies,” *Cutting & Tools in Technological System*, vol. 94, pp. 60-69, 2021.
- [N15] A. Nagy, J. Kunderak, „Analysis of the change in roughness on a face-milled surface measured every 45° direction to the feed,” *Cutting & Tools in Technological System*, vol. 95, pp. 29-36, 2021.
- [N16] A. Nagy, „Homlokmarással előállított síkfelületek érdességi és inhomogenitási vizsgálata,” *Multidiszciplináris tudományok*, vol. 11, no. 2, pp. 207-212, 2021.
- [N17] A. Nagy, J. Kunderak, „Mérési beállítások hatása a topográfia mért értékeire homlokmart felületen,” *Multidiszciplináris Tudományok*, vol. 12, no. 5, pp. 54-65, 2022.

- [N18] J. Kundrak, C. Felhő, A. Nagy, „Analysis and prediction of roughness of face milled surfaces using CAD model,” *Manufacturing Technology*, vol. 22, no. 5, pp. 558-572, 2022. (Scopus, Q3)
- [N19] A. Nagy, J. Kundrak, „Analysis of inhomogeneity of surfaces milled with symmetrical, down- and up-milling settings,” in *Development in Machining Technology – Scientific Reports vol. 10*, Krakko, Lengyelország, Cracow University of Technology, 2022, pp. 51-62.
- [N20] A. Nagy, J. Kundrak, „Roughness investigation of single and double cutting marks on face milled surface, *Cutting & Tools in Technological System*, vol. 99, pp. 58-70, 2023.
- [N21] A. Nagy, J. Kundrak, „Investigation of change in roughness in parallel sections in a direction different from feed vector on a face milled surface. in *Development in Machining Technology – Scientific Reports vol. 11*, Krakko, Lengyelország, Cracow University of Technology, 2023, pp. 67-79.
- [N22] A. Nagy, J. Kundrak, „Investigation of face milled surface topography on C45 workpiece assuming movement at 30° and 60° to feed direction,” *Cutting & Tools in Technological System*, vol. 98, pp. 116-127, 2023.
- [N23] A. Nagy, Egyszeres és kettős marónnyommal előállított homlokmart topográfia ferdeségi és lapultsági elemzése, in *"Fiatalok a Tudományért" tudományos rendezvény: Válogatott publikációk*, Miskolc-Egyetemváros, Magyarország, Miskolci Egyetem Gyártástudományi Intézet, 2023, pp. 95-100.
- [N24] A. Nagy, J. Kundrak, „Roughness of face-milled surface topography in directions relative to the feed movement. *Manufacturing Technology*, vol. 24, no. 2, pp. 241-254, 2024. (Scopus, Q2)
- [N25] A. Nagy, Analysis of amplitude roughness on a plane surface face-milled with an octagonal insert, in *"Fiatalok a Tudományért 2024" tudományos rendezvény: Válogatott publikációk*, Miskolc-Egyetemváros, Magyarország, Miskolci Egyetem Gyártástudományi Intézet, 2024, pp. 9-16.
- [N26] A. Nagy, Roughness profile element width and gradient analysis on a plane surface face-milled with an octagonal insert, in *"Fiatalok a Tudományért 2024" tudományos rendezvény: Válogatott publikációk*, Miskolc-Egyetemváros, Magyarország, Miskolci Egyetem Gyártástudományi Intézet, 2024, pp. 23-30.
- [N27] A. Nagy, Roughness investigation of a plane surface face-milled with an octagonal insert: skewness and kurtosis, in *"Fiatalok a Tudományért 2024" tudományos rendezvény: Válogatott publikációk*, Miskolc-Egyetemváros, Magyarország, Miskolci Egyetem Gyártástudományi Intézet, 2024, pp. 39-44.
- [N28] A. Nagy, „Functional roughness parameter characterization of a plane surface face-milled with an octagonal insert,” in *"Fiatalok a Tudományért 2024" tudományos rendezvény: Válogatott publikációk*, Miskolc-Egyetemváros, Magyarország, Miskolci Egyetem Gyártástudományi Intézet, 2024, pp. 51-56.

Irodalomjegyzék

- [1] H. Youssef, H. El-Hofy, M. Ahmed, *Manufacturing Technology: Materials, Processes, and Equipment*, Boca Raton, Oxon: CRC Press, 2024.
- [2] B. Griffiths, *Manufacturing surface technology: surface integrity & functional performance*, London: Penton Press, 2001.
- [3] *ISO 21920: Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Profile*, 2021.
- [4] „Most Common Metal Fabrication Techniques And Tools,” [Online]. Available: <https://www.schuettemetals.com/blog/6-most-common-metal-fabrication>. [Hozzáférés dátuma: 2024. 07. 01.].
- [5] „Metal fabrication processes: understanding the different types,” [Online]. Available: <https://www.metafab.com/metal-fabrication-processes-understanding-the-different-types/>. [Hozzáférés dátuma: 2024. 07. 01.].
- [6] J. Davim, *Surface Integrity in Machining*, London: Springer-Verlag, 2010.
- [7] G. T. Smith, *Cutting Tool Technology*, London: Springer-Verlag, 2008.
- [8] A. Meijer, J. Bergmann, E. Krebs, D. Biermann, P. Wiederkehr, „Analytical and simulation-based prediction of surface roughness for micromilling hardened HSS,” *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 3, no. 3, p. 70, 2019.
- [9] J. Kundrak, C. Felho, „3D roughness parameters of surfaces face milled by special tools,” *Manufacturing Technology*, vol. 16, no. 3, pp. 532-538, 2016.
- [10] M. Hadad, M. Ramezani, „Modeling and analysis of a novel approach in machining and structuring of flat surfaces using face milling process,” *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 105, pp. 32-44, 2016.
- [11] M. Arizmendi, A. Jiménez, „Modelling and analysis of surface topography generated in face milling operations,” *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 163, p. 105061, 2019.
- [12] D. Chuchala, M. Dobrzynski, D. Pimenov, K. Orlowski, G. Krolczyk, K. Giasin, „Surface roughness evaluation in thin EN AW-6086-T6 alloy plates after face milling process with different strategies,” *Materials*, vol. 14, no. 11, p. 3036, 2021.
- [13] G. Varga, J. Kundrák, „Effects of Technological Parameters on Surface Characteristics in Face Milling,” *Solid State Phenomena*, vol. 261, pp. 285-292, 2017.
- [14] S. Zhenyu, L. Luning, L. Zhanqiang, „Influence of dynamic effects on surface roughness for face milling process,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 80, no. 9, pp. 1823-1831, 2015.
- [15] J. Kundrak, C. Felho, „Topography of the machined surface in high performance face milling,” *Procedia CIRP*, vol. 77, pp. 340-343, 2018.
- [16] *ISO 4287: Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method — Terms, definitions and surface texture parameters*, 1997.
- [17] *ISO 4288: Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method — Rules and procedures for the assessment of surface texture*, 1996.
- [18] *ISO 25178: Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Areal*, 2021.
- [19] C. Felho, J. Kundrak, „Effect of the Changing of the feed on surface topography at face milling,” *International Journal of Mechanical Engineering*, vol. 1, pp. 114-121, 2016.
- [20] C. Felhő, „Investigation of surface roughness in machining by single and multi-point tools,” Shaker Verlag, Aachen, 2014.