



ÓBUDAI EGYETEM  
ÓBUDA UNIVERSITY

DOKTORI (PHD) ÉRTEKEZÉS  
TÉZISFÜZETE

---

VARGA BÁLINT

# Szabadformájú mart felületek mikro- és makro pontosságának vizsgálata

Témavezető: Dr. habil. Mikó Balázs

---

ANYAGTUDOMÁNYOK  
ÉS TECHNOLÓGIÁK  
DOKTORI ISKOLA

Budapest, 2023. 05. 08.

## Tartalomjegyzék

1	A kutatás előzményei .....	3
2	Célkitűzések .....	4
3	Vizsgálati módszerek .....	7
4	Új tudományos eredmények .....	9
1.	Tézis .....	9
2.	Tézis .....	9
3.	Tézis .....	10
4.	Tézis .....	10
5.	Tézis .....	10
6.	Tézis .....	11
5	Az eredmények hasznosítási lehetősége .....	12
6	Irodalmi hivatkozások listája/ Irodalomjegyzék .....	13
7	Publikációk .....	14
7.1	A disszertáció témájához kapcsolódó publikációk .....	14
7.2	További tudományos közlemények (opcionális) .....	15

# 1 A kutatás előzményei

Sok helyen találkozhatunk szabadformájú felületekkel, a gépjármű alkatrészektől kezdve a mindennapi használati tárgyakig bezárólag szinte bárhol. A szerszámtervezésben az öntőformák kialakításán keresztül a szél- és vízerőművek turbináinak alakján át az aerodinamikai kialakításig rengeteg területen használják ezeket a felületeket. Ugyanakkor a szabad formájú felületek megmunkálása a forgácsoló ipar számára az egyik legnagyobb kihívást jelentő terület. A legyártott alkatrészeknek rengeteg felhasználói igénynek, technológiai- és egyéb követelménynek kell megfelelnie. Ilyen igény lehet például esztétikai, ergonómiai, áramlástechnikai vagy formatervezési igény. A technológiai követelmények folyamatosan nőnek, egyre nagyobb pontossággal kell elkészíteni ezeket a felületeket mind érdesség, mind pedig alakpontosság szempontjából. Az eddig felsorolt igények mellett természetesen termelékenységi és gazdaságossági igényeknek is meg kell felelni.

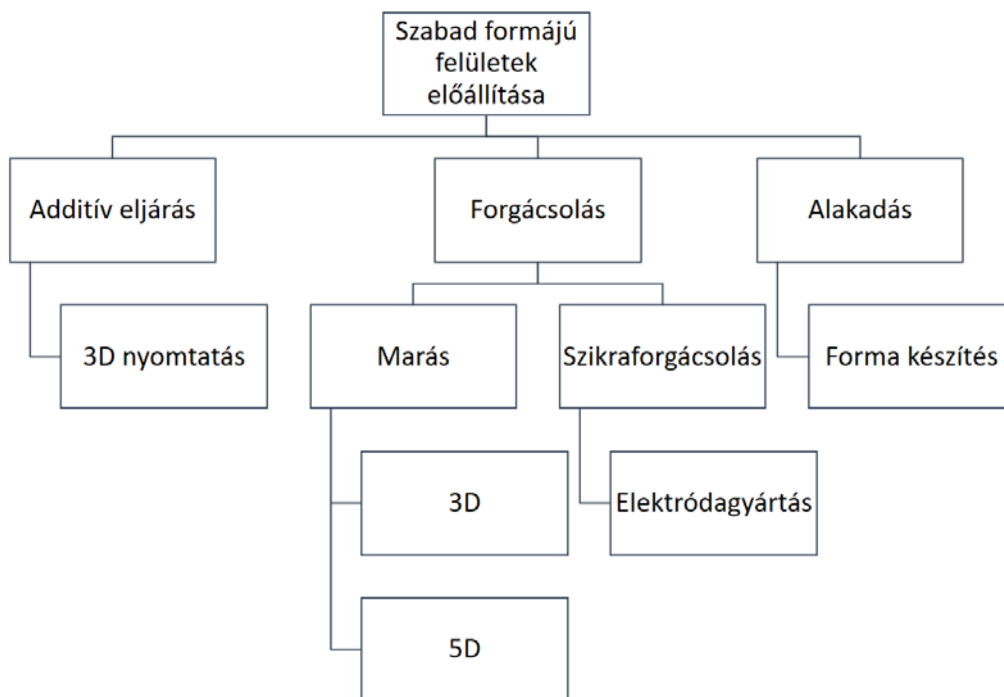
A gyártási folyamat megtervezése összetett feladat. Figyelembe kell venni a gyártáshoz és a minőség-ellenőrzéshez rendelkezésre álló eszközöket. Egyes termékek gyakran nehezen megmunkálható anyagból készülnek, és bonyolult geometriával rendelkeznek [1]. Ezek a tényezők megnehezítik a gyártás tervezését.

A szabad formájú felületek forgácsolással történő előállítására gömbvégű marószerszámmal, 3 vagy 5 tengelyes marással történik [2]. A gyártáshoz szükséges szerszámok létrehozásához minden esetben elengedhetetlen egy CAM (Computer Aided Manufacturing) szoftver alkalmazása [3]. Különböző megmunkálási stratégiával különböző szerszámok állíthatók elő, melyek hatással vannak a termelékenységre és a pontosságra [4]. A forgácsolási paraméterek helyes megválasztása is egy fontos szempont, mert nagy hatással vannak a létrehozott felület tulajdonságaira [5]. Egy felület pontosságát három szempont szerint szokás vizsgálni, ezek a méretpontosság, az alakpontosság [6] és a felületi érdesség [7].

## 2 Célkitűzések

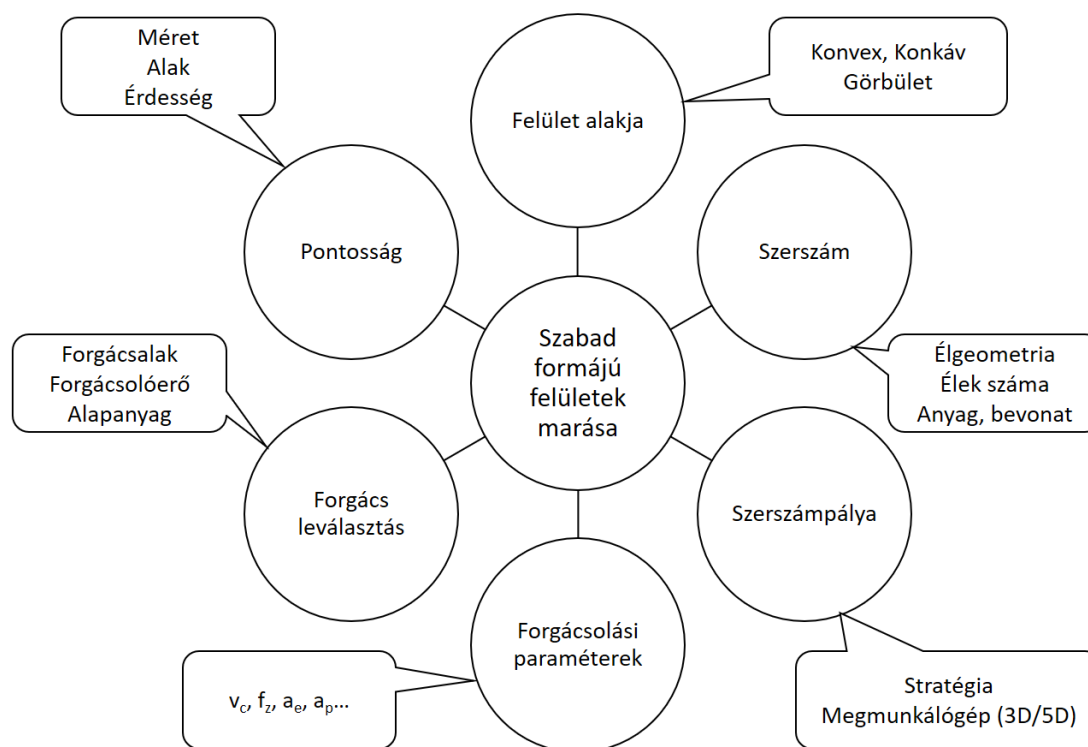
A kutatás a gömbvégű marószerszám segítségével előállított szabadformájú felületek pontosságának elméleti és kísérleti vizsgálatát tárgyalja (1. ábra). A felületek ilyen módon történő megmunkálásának számos szempontja van, melyek nagy része vizsgálatra is került. A vizsgált szempontok kiválasztása a hazai és a külföldi szakirodalom kutatásán alapult.

A kutatás foglalkozik a szabad formájú felületek geometriai jellemzőinek vizsgálatával. A jellemzők tulajdonságaival, létrehozásával és ipari felhasználásával. Kitérek az ilyen felületekkel rendelkező alkatrészek előállítására, az alkalmazható technológiák jellemzésére.



1. ábra: Szabad formájú felületek előállítása

Az irodalmi áttekintés, egy csoportosítást követően részletesen tárgyalja a szakirodalomban található különböző, szabad formájú felületek megmunkálásával, mérésével, pontosságával kapcsolatos szempontokat, kutatási irányokat és eredményeket.



2. ábra: Vizsgálati szempontok csoportosítása

A kutatás során végeztem elméleti és kísérleti vizsgálatokat, a kapott adatokat elemeztem és azok alapján a következtetések vontam le.

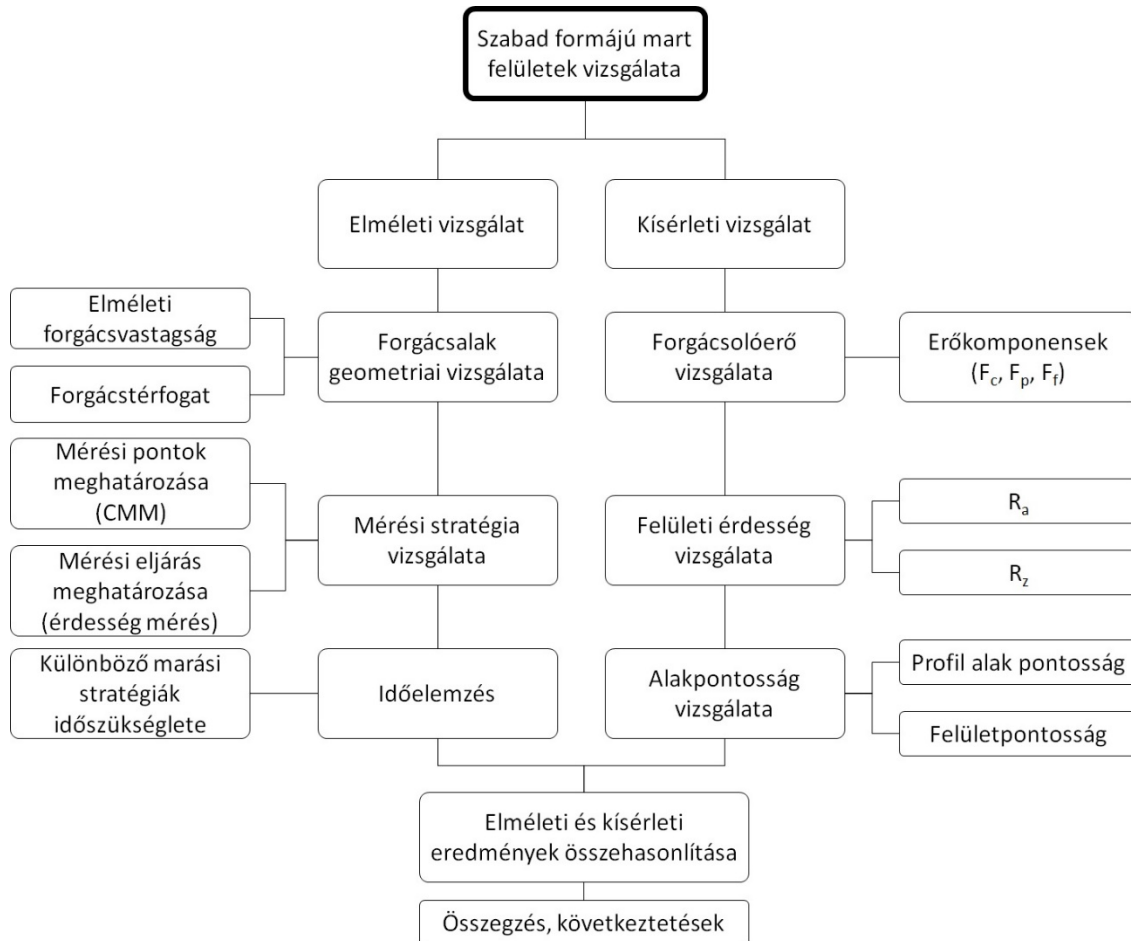
Elméleti vizsgálatok során elemeztem a geometriai modellezéssel előállítható elméleti forgács tulajdonságokat, az alakpontosság megállapításához szükséges és elégséges mérési pontok számát. A kísérleti vizsgálatok során a CAM rendszerben beállítható szerszám-pályák, technológiai paraméterek vizsgálata volt a fő kutatási szempont. Elemeztem továbbá a marás során ébredő erőket és azok hatását. Mindezeket a felületi pontosságra gyakorolt hatása tekintetében értékeltem. A kísérleti szakasz, több fázisban, hosszabb idő alatt valósult meg, ezek bemutatása nem időrendben történik, hanem logikai sorrend alapján. A kísérleteket a Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Gépészeti és Technológiai Intézetében (korábban Anyag- és Gyártástudományi Intézet) folytattam. A tézisek ismertetése, az összefoglalás és a további kutatások ismertetése zárja az értekezésem.

A kutatás célja szabad formájú felületek gömbvégű maróval történő megmunkálásának technológiai vizsgálata, mely kiterjed a felületek dimenzionális és geometriai pontosságára, a felületi érdességre. A technológiai szempontú megközelítés azt jelenti, hogy a kutatás során olyan vizsgálatokat és elemzéseket végzek, melyek segítik a technológiai tervezés folyamatát, támogatják a technológus mérnök CAM rendszerben végzett szerszám-pálya tervezési

munkáját. A kutatás eredményei támogatják a CAM rendszerek hatékonyabb használatát, segítenek olyan szerszámpanyákat kiválasztani, melyek pontosabb és hatékonyabb megmunkálás tesznek lehetővé.

### 3 Vizsgálati módszerek

Az értekezésben ismertettem a szabad formájú felületek geometriai jellemzőit, tulajdonságait, létrehozását és ipari felhasználását. Elméleti és kísérleti vizsgálatok segítségével megvizsgáltam a különböző technológiai paraméterek, geometriai jellemzők hatását a mikro- és makro pontosságra.



3. ábra: A vizsgálat folyamata

Elméleti vizsgálatok:

- Elemeztem a geometriai modellezéssel előállítható elméleti forgács tulajdonságokat.
- Vizsgáltam az alakpontosság megállapításához szükséges és elégséges mérési pontok számát
- Időelemzést végeztem a különböző szerszám pályák tekintetében.

A kísérleti vizsgálatok:

- Elemeztem a CAM rendszerben beállítható szerszám pályákat (söprés, kontúr vezérelt, spirális),

- forgácsolási paramétereiket (fogankénti előtolás  $v_f$ , oldallépés  $a_e$ ),
- a munkadarab geometriai jellemzőinek (konvexitás, görbület, felületi normális) hatását a szabad formájú felületek mikro- és makropontosságára (felületi érdesség, méret- és alakpontosság).
- Vizsgáltaom a marás során ébredő erőket ( $F_c$ ,  $F_f$ ,  $F_p$ ,  $F$ ) és azok hatását. Mindezeket szintén a felületi pontosság tekintetében értékelem.



## 4 Új tudományos eredmények

### 1. Tézis

Kidolgoztam egy CAD szimulációs módszert, mellyel meg lehet határozni szabad formájú felületek gömbvégű marása során a keletkező forgács alakját, térfogatát, közepes vastagságát. (Vizsgálati paraméterek tartományai:  $D_c = 10$  mm;  $a_p = 0,3$  mm;  $f_z = 0,08-0,16$  mm;  $a_e = 0,15-0,35$  mm.)

A szimulációs eredmények alapján megállapítottam, hogy homorú és domború felületek esetén a forgácstérfogat és a közepes vastagság eltérő módon változik. A közepes forgácsvastagság pálya menti változása (szórás) jelentős és függ a marási iránytól, azonban átlag értéke csak kis mértékben érzékeny a marási irányra. A forgácstérfogat átlagértéke és szórása nem érzékeny a marás irányára.

A szimulációs adatok alapján regressziós modellt hoztam létre, ami jó közelítéssel határozza meg a forgács elméleti közepes vastagságát, figyelembe véve az előtolás, a fogásszélesség, az előtolási irány és a felületi normális értékét. A bemutatott szimulációs és regressziós módszer lehetőséget teremt a szerszámterhelés változásainak vizsgálatára, a megfelelő marási stratégia kiválasztására és az elméleti érdekesség meghatározására is.

### 2. Tézis

Szabad formájú mart felület koordináta mérőgépen végzett felület mérése során vizsgáltam a mérési pontok ideális számát és a pontmintavételezési módszereket és hatásukat a vizsgált méret- és alakpontosságra. (Vizsgálati paraméterek: Felület nagysága 80 x 80 mm; felület jellege: homorú és domború; pontmintavételezési stratégia: mátrix és Halton-Zaremba.)

Az elemzés alapján megállapítható, hogy a mérethiba esetén a pontok száma és a pontmintavételi módszer csak kis mértékben befolyásolja a mért értékeket. A hengeresség és a felületi profil hibája esetén a felület jellege (domború vagy homorú) és a marási paraméterek hatással vannak a hibák értékére. A pontok számának növelése javítja az értékek pontosságát.

A mért adatok alapján megállapítottam, hogy létezik a pontok számára vonatkozó olyan határ, amely felett a felületi profilhiba értéke csak kis mértékben növekszik, így ez jelenti a mérések során alkalmazandó legkisebb értéket. A kísérletek alapján ez az érték független a vizsgált mintavételezési módszerektől.

### 3. Tézis

Egy irányba görbült szabad formájú felületek gömbvégű maróval történő simító marási kísérleteivel igazoltam, hogy a homorú munkadarabok felületi érdessége jobb, mint a domború daraboké. Ezt a tendenciát nem befolyásolja a fogankénti előtolás értéke vagy az oldallépés (fogásszélesség) nagysága.

A felületi érdesség értékét azonban nagymértékben befolyásolja a felületi normális vektor és a szerszámtengely egymáshoz képesti viszonylagos helyzete. Ahol a vektor párhuzamos a szerszám tengelyével (vízszintes felületek), ott tapasztaltam a legrosszabb érdességértékeket, mivel a gömbvégű maró és a munkadarab ebben az esetben érintkezik a legkisebb felületen és a legkisebb szerszám átmérőn.

Az érdesség értékét a szerszám pályája iránya jelentősen befolyásolja, ezért ennek helyes megválasztásával a felületi érdesség javítható. (Vizsgálati paraméterek:  $n = 5100$  1/min;  $D_c = 10$  mm;  $v_f = 1650$  mm/min;  $a_p = 0,3$  mm;  $f_z = 0,08$  mm;  $a_e = 0,35$  mm;)

### 4. Tézis

Egy irányba görbült szabad formájú felületek gömbvégű maróval történt simító marási kísérleteivel igazoltam, hogy a mérethiba (dimenzionális hiba) a szerszám pályája irányával változik, de a felületek jellege lényegesen befolyásolja azt. Az elvégzett kísérletek alapján a homorú próbatestek sugara nagyobb, a domború próbatestek esetében pedig kisebb, mint a névleges érték.

A forgácsolási paraméterek és a pásztázási mód (szerszám pályája stratégia) kevésbé befolyásolja a méretpontosságot, mint a felület jellege háromtengelyes megmunkálás esetén. (Vizsgálati paraméterek:  $n = 5100$  1/min;  $D_c = 10$  mm;  $v_f = 1650$  mm/min;  $a_p = 0,3$  mm;  $f_z = 0,08$  mm;  $a_e = 0,35$  mm;)

### 5. Tézis

Gömbvégű maróval mart szabadformájú felület alakpontosságának vizsgálatakor megállapítottam, hogy a hengeresség és a felületi profilhiba érzékeny a felület jellegére. (Vizsgálati paraméterek tartományai:  $D_c = 10$  mm;  $a_p = 0,3$  mm;  $f_z = 0,08-0,16$  mm;  $a_e = 0,15-0,35$  mm.)

A profilhiba értékét nagymértékben befolyásolja a megmunkálás iránya (pásztázási irány), valamint az előtolási sebesség és az oldallépés. Azonos geometriai kialakítás mellett, a domború

felületek kisebb geometriai hibával rendelkeznek. A domború és a homorú próbatestek esetében az eltérés akár kétszeres is lehet.

A vizsgálatok alapján megállapítottam, hogy a marási iránynak nagyobb hatása van az alakhűségre, mint a marási paramétereknek. Ennek oka, hogy a felület változása és az előtolás iránya miatt torzulnak a névleges forgácsolási paraméterekből adódó geometriai viszonyok.

## **6. Tézis**

Szabad formájú felületek simító marási kísérleteivel igazoltam, hogy az eredő forgácsolóerő és az egyes erőkomponensek (axiális, előtolás irányú, előtolásra merőleges) a megmunkálási folyamat során nagymértékben változik és az eredő erő változását követi a mart felület geometriai pontossága, azonban az erő változása eltér az elméleti közepes forgácsvastagság változásától. Domború munkadarabok esetén a forgácsolóerő nagyobb és a vízszintes felületi szakaszoknál az erő maximális értéket vesz fel. (Vizsgálati paraméterek tartományai:  $D_c = 10$  mm;  $a_p = 0,3$  mm;  $f_z = 0,08-0,16$  mm;  $a_e = 0,15-0,35$  mm.)

Bemutattam, hogy az erőimpulzus hatékonyan használható a megmunkálási paraméterek által okozott erő- és megmunkálási időváltozások hatásának összehasonlítására. Az eredő erő változását nemcsak a forgács keresztmetszetének változása határozza meg, hanem a szerszám ténylegesen megmunkáló szakaszának körülményei is. Amikor a szerszám csúcsa részt vesz a megmunkálásban (vízszinteshez közeli felületek), a forgácsolóerő jelentősen megnő, az alak eltéréssel együtt.

Kísérleti eredmények alapján javasoltam, hogy a gömbvégű szerszámmal történő szabad formájú felületek simító megmunkálásához olyan marási stratégia legyen választva, amelyben a szerszám csúcsa a legkevésbé vesz részt a megmunkálásban a forgácsolóerő és az alak eltérés csökkentése érdekében. A forgácsolóerő számításal történő meghatározásakor a forgácskeresztmetszet mellett a szerszám munkaszelvényének helyzetét is figyelembe kell venni, mivel ez jelentősen befolyásolja a forgácsolóerőt.

## 5 Az eredmények hasznosítási lehetősége

A doktori értekezésemben a szabad formájú mart felületek megmunkálásának elméleti és kísérleti vizsgálatát végeztem el. A kutatás technológiai szempontból vizsgálta a megmunkált felületek geometriai pontosságának okait, így az eredmények hasznosítása is ezen a területen történhet.

Kutatásom eredményeként az ipari gyakorlatban hasznosítható, a technológiai tervezés során alkalmazható összefüggéseket és következtetéseket határoztam meg. Ezek alapot teremtenek az elméleti fogácsvastagság gyors meghatározására, ami szükséges a forgácsolás során fellépő erő és az ebből adódó felületi profilhiba becslésére. Az eredmények segítik a megfelelő CAM mozgás stratégia kiválasztását, valamint a szerszám pályát meghatározó paraméterek helyes megválasztását, figyelembe véve a felületre vonatkozó tűréseket.

A kutatás jövőbeni folytatására több területen is lehetőség van:

- A CAD modell alapján készített regressziós modell bővítése a fogásmélység és a szerszámátmérő figyelembe vételével.
- A forgácsolási paraméterek hatásának részletes vizsgálata a felület alakhiba vonatkozásában.
- A kísérleti eredmények felhasználásával épített matematikai modell alapján egy szimulációs alkalmazás fejlesztése, amely a felület alakját, a forgácsolási paramétereket és a szerszám pályát figyelembe véve képes becsülni a felület alakeltéréseit.

## 6 Irodalmi hivatkozások listája/ Irodalomjegyzék

- [1] Kátai L. (szerk.)(2012) CAD tankönyv, Egyetemi jegyzet, ISBN: 978-963-279-534-8.
- [2] Scandiffio, I., Diniz, A. E., & de Souza, A. F. (2016). Evaluating surface roughness, tool life, and machining force when milling free-form shapes on hardened AISI D6 steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 82(9), 2075-2086.
- [3] Mawussi, K. B., & Tapie, L. (2011). A knowledge base model for complex forging die machining. *Computers & Industrial Engineering*, 61(1), 84-97.
- [4] Chen, T., & Shi, Z. (2008). A tool path generation strategy for three-axis ball-end milling of free-form surfaces. *Journal of materials processing technology*, 208(1-3), 259-263.
- [5] Wojciechowski, S., Maruda, R. W., Barrans, S., Nieslony, P., & Krolczyk, G. M. (2017). Optimisation of machining parameters during ball end milling of hardened steel with various surface inclinations. *Measurement*, 111, 18-28.
- [6] Mikó Balázs: Tűrésezési folyamat kapcsolatai és hatásai; III. Gépészeti Szakmakultúra Konferencia; 2018. Február 1. Budapest; ID: 2A1
- [7] Farkas, G., & Drégelyi-Kiss, Á. (2018, November). Measurement uncertainty of surface roughness measurement. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 448(1) 012020

## 7 Publikációk

### 7.1 A disszertáció témájához kapcsolódó publikációk

- [S-1.] Varga B., Mikó B. (2017) Szabad formájú mart felületek érdességének változása a simítási irány függvényében. *International Engineering Symposium, IESB2017.* (magyar nyelvű konferencia előadás és absztrakt)
- [S-2.] Mikó B., Varga B. (2017) Forgácsolási paraméterek hatása gömbvégű maróval mart sík felület érdességére. *International Engineering Symposium, IESB2017.* (magyar nyelvű konferencia előadás és absztrakt)
- [S-3.] Varga B., Mikó B. (2018) *Curved surface roughness and cylindricity. Development in Machining Technology – Scientific Research Report Vol.8 pp.66-75 Ed.: W. Zebala, I. Manková; Cracow University of Technology, Cracow 2018. ISBN 978-80-553-2718-1* (idegen nyelvű konferencia cikk)
- [S-4.] Varga B., Mikó B. (2018) Szabad formájú mart felületek érdességének változása a simítási irány függvényében. *Bánki közlemények 2 pp. 85-90., 6 p.* (magyar nyelvű folyóirat cikk)
- [S-5.] Varga B., Mikó B. (2018) *Investigate of geometric accuracy of free-form surface profile. Multiscience XXXII. MicroCAD International Multidisciplinary Scientific Conference, Miskolci Egyetem Paper D2, 8 p.* (idegen nyelvű konferencia cikk)
- [S-6.] Varga B., Mikó B. Zebala W. (2019) *The Effect of the Feed Direction on the Micro- and Macro Accuracy of 3D Ball-end Milling of Chromium-Molybdenum Alloy Steel. Materials 12(24) p. 4038* (idegen nyelvű folyóirat cikk, Q2 IF3,057)
- [S-7.] Varga B., Mikó B. (2019) *Felületi érdesség változása szabad formájú felület marása során. Proceedings of the Engineering Symposium at Bánki (ESB2019) Óbudai Egyetem 94 p. pp. 49-54.* (magyar nyelvű konferencia cikk)
- [S-8.] Varga B., Mikó B. (2021) *Impact of Different CAM Strategies and Cutting Parameters on Machining Free-Form Surface with Ball-End Milling Tools in Terms of Micro and Macro Accuracy. Acta Polytechnica Hungarica 18(7) pp. 109-127.* (idegen nyelvű folyóirat cikk, Q2 IF1,711)
- [S-9.] Varga B., Mikó B. (2022) *CAD modelling of the chip shape in case ball-end milling. Engineering and IT Solutions 3(2) pp.30-38 doi:10.37775/EIS.2022.2.3* (idegen nyelvű folyóirat cikk)
- [S-10.] Varga B., Mikó B. (2022) *The effect of the point sampling to the result of coordinate measuring of free-form surface. Cutting & Tooling in Technological Systems*

*(Rezanie i instrumenty v tekhnologicheskikh sistemah) (ISSN 2078-7405) 96 pp.89-98  
doi: 10.20998/2078-7405.2022.96.10 (idegen nyelvű folyóirat cikk)*

- [S-11.] Varga B.; Mikó B. (2023) *Investigation of the cutting force and surface profile error when free form milling. Acta Technica Jaurinensis, 16(1):27-33, 2023 DOI: 10.14513/actatechjaur.00685 (idegen nyelvű folyóirat cikk)*
- [S-12.] Varga B.; Mikó B. (2023) *Regression model of uncutted chip thickness when ball end milling. Proceedings of Development in Machining Conference - DiM 2023 ; Crakow, Poland 27-28.04.2023. Development in machining technology 11:xx-xx Ed.: W. Zebala, I. Manková; Cracow University of Technology, Cracow 2023 (megjelenés alatt) (idegen nyelvű konferencia cikk)*

## **7.2 További tudományos közlemények (opcionális)**

- [S-1.] Varga B., Mikó B. (2010) *Energetikai rendszerek CAD/CAE tervezése szoftverek kombinálásával. CAD: CAD/CAM/CAE, PLM, RPT, FEA 1 pp. 22-25.*
- [S-2.] Mikó B., Csesznok S., Varga B. (2013) *Prototípus alkatrészgyártás lehetőségei. Gyártóeszközök, szerszámok, szerszámgépek 1pp. 58-61., 4 p.*
- [S-3.] Mikó B., Varga B., Bille P., Vinis P. (2016) *Gépipari alkatrészek digitalizálása. Gyártóeszközök, szerszámok, szerszámgépek 19: 1pp. 32-34.*
- [S-4.] Varga B., Mikó B. (2017) *A felületmodellezés jelentősége a fordított mérnöki munka során. Gyártóeszközök, szerszámok, szerszámgépek 1pp. 16-19., 4 p.*
- [S-5.] Mikó B., Tóth B., Varga B. (2017) *Comparison of Theoretical and Real Surface Roughness in Case of Ball-End Milling. Solid State Phenomena 261 pp. 299-304., 6 p.*
- [S-6.] Mikó, B., Horváth, T., Varga, B. (2018) *Cusp height and surface roughness in z-level milling. Development in Machining Technology – Scientific Research Report Vol.8*
- [S-7.] Czifra Gy., Varga B. (2018) *Modern Teaching Methods in Today's Engineering Education. Konferencia Pécs*