

MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR



**ROTÁCIÓS ESZTERGÁLÁSSAL VÉGZETT
PRECÍZIÓS BEFEJEZŐ MEGMUNKÁLÁS VIZSGÁLATA**

PHD ÉRTEKEZÉS

Készítette:

Sztankovics István
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. Kunderák János
a műszaki tudomány doktora, Professor Emeritus

Miskolc
2022

TARTALOMJEGYZÉK

Ábra- és táblázatjegyzék.....	V
Témavezető ajánlása	VIII
Köszönetnyilvánítás.....	IX
Értekezésben alkalmazott jelölések	X
Bevezetés.....	1
1 Szakirodalmi áttekintés, tudományos előzmények	2
1.1 Forgácsoló eljárások helye a gyártási folyamatokon belül.....	2
1.2 A forgácsoló szerszámgépek és az esztergálás	5
1.3 Nagy termelékenységű, befejező esztergáló eljárások	6
1.3.1 Hántoló esztergálás	7
1.3.2 Esztergálás forgó dolgozórészű szerszámmal.....	8
1.3.3 Tangenciális esztergálás.....	9
1.3.4 A rotációs esztergálás.....	10
1.4 Gyártásgeometriai módszer fejlődése.....	12
2 Az értekezés célkitűzései és a megvalósítás módszerei	14
2.1 Az értekezés célkitűzései	14
2.2 Az elméleti vizsgálatok módszere	15
2.3 A forgácsolási kísérletek körülményei	16
2.3.1 Kísérleti feltételek	16
2.3.2 Forgácsoló erő mérése	18
2.3.3 Megmunkált felület érdességének vizsgálata.....	21
3 A rotációs esztergálást leíró matematikai-analitikai modell	22
3.1 Az eljárás kinematikai modellje	22
3.1.1 Geometriai és kinematikai vizsgálat	22
3.1.2 Alkalmazott koordináta-rendszerek	23

3.1.3	Transzformációs egyenletek	24
3.2	A szerszámél és a forgácsolt felület	26
3.2.1	A forgácsoló él	26
3.2.2	A forgácsolt felület kétparaméteres egyenlete	27
3.2.3	A forgácsolt felület alapsíkbeli metszete	28
4	Forgácsjellemzők értékeinek meghatározása.....	30
4.1	A forgácsleválasztás jellege és szakaszai	30
4.2	Számítási módszer a forgácsvastagság és –szélesség meghatározására	31
4.2.1	Az állandó forgácskeresztmetszet szakaszának vizsgálata	31
4.2.2	A Bekezdési szakasz analízise	34
4.2.3	A Befejező szakasz elemzése.....	37
4.3	A forgácskeresztmetszet elméleti értékeinek változása.....	39
4.3.1	Az Állandósult szakasz vizsgálata	39
4.3.2	A Bekezdési szakasz elemzése	41
4.3.3	A Befejező szakasz vizsgálata	42
4.4	A forgácsjellemzők vizsgálati eredményeinek összefoglalása	43
5	A forgácsleválasztás hatékonysága.....	44
5.1	A forgácsolási szakaszok összefüggései.....	44
5.1.1	A Bekezdési szakasz kezdete	45
5.1.2	A munkadarabból való kilépés kezdete	47
5.1.3	A szerszám munkaútja, szögelfordulása és a gépi főidő.....	49
5.2	A gépi főidő, a felületképzés sebessége és az anyagleválasztási ráta	50
5.3	A rotációs esztergálást befolyásoló paraméterek hatása.....	51
5.4	A hatékonyságelemzés eredményeinek összefoglalása	54
6	Rotációs esztergálással megmunkált felület topográfiája	55
6.1	A felület érdesség egyes mérőszámainak elméleti értékei	55
6.1.1	Az egyenetlenség-magasság	56
6.1.2	Az átlagos érdesség	57
6.2	A megmunkált felület sodratossága.....	58
6.3	A befolyásoló paraméterek hatása	59
6.3.1	Az elméleti érdességi profil változása	59

6.3.2	A sodrat elméleti értékeinek vizsgálata	62
6.4	Elméleti felületprofil vizsgálatának eredményei	64
7	Kísérleti eredmények kiértékelése.....	66
7.1	A forgácsolóerő mérési eredményeinek kiértékelése	66
7.1.1	A forgácsolóerő időbeli lefolyása	66
7.1.2	Erőkomponensek maximális értékei	67
7.1.3	Fajlagos forgácsolóerők az Állandósult szakaszban	70
7.1.4	Dinamikus terhelés a Bekezdési szakaszban	73
7.2	Felületi érdesség kísérleti és elméleti értékeinek összehasonlító elemzése	75
7.2.1	Kísérleti eredményeinek kiértékelése	75
7.2.2	Az elméleti és kísérleti eredmények összehasonlítása.....	77
7.2.3	Az elméleti érdesség korrigált számítóképlete.....	81
7.3	Kísérleti eredmények összefoglalása	83
8	Új tudományos eredmények, Tézisek.....	84
8.1	Tézisek.....	84
8.2	A hasznosítás és a továbbfejlesztés lehetőségei	85
	Összefoglalás	86
	Summary	87
	Irodalomjegyzék	88
	Az értekezés témájában megjelent saját publikációk	95
	Mellékletek	1
M.1.	Az elvégzett kísérletek technológiai adatai	1
M.2.	Az erőmérés kísérleti és elméleti eredményei	2
M.3.	A felületi érdesség kísérleti és elméleti eredményei.....	10
M.4.	Az elméleti és a mért érdességi profilok összehasonlítása	18

ÁBRA- ÉS TÁBLÁZATJEGYZÉK

1.1. ábra.	Különféle autóipari alkatrészek előállítási költségének megoszlása.....	2
1.2. ábra.	Megmunkálások összehasonlítása	3
1.3. ábra.	Kemény felületek köszörülésének és esztergálásának összehasonlítása	4
1.4. ábra.	A hántoló esztergálás és kinematikai vázlata	8
1.5. ábra.	Forgó dolgozórészű szerszámmal végzett forgácsolás jellegzetes esetei.....	8
1.6. ábra.	A tangenciális esztergálás és kinematikai vázlata	9
1.7. ábra.	A rotációs esztergálás kinematikai vázlata és szerszáma	11
2.1. ábra.	A vizsgálatok menete	15
2.2. ábra.	A szerszám és a munkadarab egymáshoz viszonyított helyzete és mozgásai	17
2.3. ábra.	Forgácsoló szerszámok befogási módja	17
2.4. ábra.	Az erő és érdességmérő rendszer felépítése, az erőmérő tengelyei.....	19
2.5. ábra.	A géphez kötött és a szerszámmal kötött koordináta-rendszerek kapcsolata	19
2.6. ábra.	A mért F_x , F_y , és F_z erőkből számított F_c , F_p és F_f erők.....	20
3.1. ábra.	A rotációs esztergálás kinematikai vázlata.....	22
3.2. ábra.	A rotációs esztergálás matematikai-analitikai modellje	24
3.3. ábra.	A forgácsoló él csavarvonal geometriája	26
3.4. ábra.	A forgácsolt felület generálása a szerszámmal görbájéből.....	27
3.5. ábra.	A forgácsolt felület alapsíkbeli metszete.....	29
4.1. ábra.	A forgácsolási folyamat szakaszai rotációs esztergálásnál	30
4.2. ábra.	Forgácsleválasztás Állandósult szakasz létrejöttével, illetve elmaradásával	31
4.3. ábra.	Az Állandósult forgácskeresztmetszet alakja.....	31
4.4. ábra.	A forgácsolt felület jellegzetes pontjai	32
4.5. ábra.	A forgácskeresztmetszet alakja	34
4.6. ábra.	A Bekezdési szakasz első két intervalluma: Háromszög és Trapéz alakú forgács	35
4.7. ábra.	A Bekezdési szakasz harmadik intervalluma: Átmeneti alakú forgács.....	36
4.8. ábra.	A Befejező szakasz első intervalluma: Átmeneti alakú forgács.....	37
4.9. ábra.	A Befejező szakasz második és harmadik intervalluma: Trapéz és Háromszög alakú forgács.....	38
4.10. ábra.	A szerszám és a munkadarab fordulatszámának hatása	39

4.11. ábra.	A terelőszög és a szerszámsugár hatása	39
4.12. ábra.	A munkadarab átmérő és a kiegészítő tengelyirányú előtolás hatása.....	40
4.13. ábra.	Forgácsvastagság és -szélesség a fogásmélység függvényében.....	40
4.14. ábra.	Forgácsszélesség és forgácskeresztmetszet változása a Bekezdési szakaszban....	41
4.15. ábra.	Az ekvivalens forgácsvastagság változása a Bekezdési szakasz során	41
4.16. ábra.	Forgácsszélesség és forgácskeresztmetszet változása a Befejező szakasz során ..	42
4.17. ábra.	Az ekvivalens forgácsvastagság változása a Befejező szakasz során	42
4.18. ábra.	A rotációs esztergálást leíró paraméterek háromszoros értékének hatása a forgácsvastagság és az ekvivalens forgácsvastagság elméleti értékeire.....	43
5.1. ábra.	A Bekezdési szakasz jellegzetes élhelyzetei	45
5.2. ábra.	A Bekezdési szakasz jellegzetes élhelyzetei	48
5.3. ábra.	A fogásmélység hatása	51
5.4. ábra.	A kiegészítő axiális előtolás és a szerszámfordulatszám hatása	52
5.5. ábra.	A munkadarab átmérő és a megmunkált hossz hatása	52
5.6. ábra.	A terelőszög és a szerszámsugár hatása	53
5.7. ábra.	A rotációs esztergálást leíró paraméterek háromszoros értékének hatása a felületképzési sebesség és az anyagleválasztási ráta elméleti értékeire	54
6.1. ábra.	Érdességi paraméterek geometriai értelmezése hegyes és rádiuszos csúcs esetén	55
6.2. ábra.	Kinematikai és geometria viszonyokból eredő érdességprofil.....	56
6.3. ábra.	Az átlagos érdesség származtatása	57
6.4. ábra.	A sodrat paramétereinek értelmezése	58
6.5. ábra.	A szerszám- és a munkadarabfordulatszám hatása a sodratparaméterekre	63
6.6. ábra.	A terelőszög és a szerszámsugár hatása a sodratparaméterekre	63
6.7. ábra.	A kiegészítő előtolás és a munkadarabátmérő hatása a sodratparaméterek	63
6.8. ábra.	A rotációs esztergálást leíró paraméterek háromszoros értékének hatása az átlagos érdesség és egyenletlenségmagasság elméleti értékeire.....	65
6.9. ábra.	A rotációs esztergálást leíró paraméterek háromszoros értékének hatása a sodrat mélység -periódushossz és -szög elméleti értékeire.....	65
7.1. ábra.	A forgácsoló erő komponensei az idő függvényében R30 szerszámnál	67
7.2. ábra.	A főforgácsoló erő és a tengelysíkban ható erő változása az előtolás függvényében	68
7.3. ábra.	Az előtolás irányú erő változása az előtolás függvényében	69
7.4. ábra.	F_f / F_c és F_p / F_c arányok változása az előtolás függvényében.....	70
7.5. ábra.	A fajlagos főforgácsoló erő és a tengelysíkban ható fajlagos erő változása az előtolás függvényében	71
7.6. ábra.	A fajlagos előtolás irányú erő változása az előtolás függvényében	71
7.7. ábra.	A fajlagos főforgácsolóerő az ekvivalens forgácsvastagság függvényében.....	72

7.8. ábra.	A főforgácsoló erő idő szerinti változása különböző előtolásoknál $\lambda_s = 30^\circ$ -os szerszámnál	73
7.9. ábra.	A főforgácsoló erő idő szerinti változása különböző fogásmélységeknél $\lambda_s = 30^\circ$ -os szerszámnál $f_a = 0,4$ és $1,0$ mm/ford. előtolásoknál	73
7.10. ábra.	A főforgácsoló erő és a tengelysíkban ható erő idő szerinti első deriváltja az előtolás függvényében a Bekezdési szakasz során	74
7.11. ábra.	Az előtolás irányú erő idő szerinti első deriváltja az előtolás függvényében a Bekezdési szakasz során	75
7.12. ábra.	Az átlagos érdesség és egyenetlenség-magasság az előtolás függvényében	76
7.13. ábra.	Megmunkált felületek 3D-s mérési eredményei	76
7.14. ábra.	Az átlagos érdesség és egyenetlenség-magasság változása különböző fogásmélységeknél az előtolás függvényében	77
7.15. ábra.	A vizsgált érdességi paraméterek az előtolás függvényében R13 szerszámnál különböző fogásmélységnél és forgácsoló sebességnél	78
7.16. ábra.	A vizsgált érdességi paraméterek az előtolás függvényében R15 szerszámnál különböző fogásmélységnél és forgácsoló sebességnél	78
7.17. ábra.	A vizsgált érdességi paraméterek az előtolás függvényében R30 szerszámnál különböző fogásmélységen és forgácsoló sebességnél	79
7.18. ábra.	A vizsgált érdességi paraméterek az előtolás függvényében R45 szerszámnál különböző fogásmélységen és forgácsoló sebességnél	80
7.19. ábra.	A vizsgált érdességi paraméterek az előtolás függvényében R50 szerszámnál különböző fogásmélységen és forgácsoló sebességnél	80
7.20. ábra.	Az átlagos érdesség mért és a számított értékeinek viszonya az alapegyenlet és a korrigált egyenlet alkalmazása esetén	82
7.21. ábra.	Az átlagos egyenetlenségmagasság mért és a számított értékeinek viszonya az alapegyenlet és a korrigált egyenlet alkalmazása esetén	82
1.1. táblázat.	A vizsgált eljárások.....	7
2.1. táblázat.	Az elméleti vizsgálatok tartománya.....	16
2.2. táblázat.	A kísérletek során használt szerszámok fő jellemzői	18
6.1. táblázat.	A munkadarab fordulatszám hatása az érdességprofilra	60
6.2. táblázat.	A forgácsoló él terelőszögének hatása az érdességprofilra	60
6.3. táblázat.	A szerszám fordulatszám hatása az érdességprofilra.....	61
6.4. táblázat.	A szerszámsugár hatása az érdességprofilra.....	61
6.5. táblázat.	A kiegészítő tengelyirányú előtolás hatása az érdességprofilra	62
6.6. táblázat.	A munkadarabátmérő hatása az érdességprofilra	62
7.1. táblázat.	A kísérletek során használt szerszámok fő jellemzői	81
7.2. táblázat.	Az érdességi mérőszámok számítóképleteinek korrekciós tényezői	81

TÉMAVEZETŐ AJÁNLÁSA

Sztankovics István: „Rotációs esztergálással végzett precíziós befejező megmunkálás vizsgálata” című PhD értekezéséhez

A megmunkálások fejlesztése a legközvetlenebb hatással van a termelőeszközök és a szolgáltatások előállításának hatékonyságára és a termék (gyártmány) minőségére. A forgácsoló megmunkálásoknak változatlanul jelentős a részaránya ezekben a folyamatokban. Az eljárások közül a körelőtolással végzett esztergálásra vonatkozó, szakirodalomban közölt vizsgálatok száma korlátozott, mind az anyagleválasztást befolyásoló paraméterek száma, mind a számítások pontossága vonatkozásában. A kutatás témája a rotációs esztergálás tudományos elemzése, a forgácsleválasztást befolyásoló kinematikai-geometriai viszonyok és a technológiai paraméterek hatásának feltárása a precíziós követelményeknek megfelelő alkatrészek gyártásához (előállításához).

A bemutatott eredmények igazolják, hogy a kutatómunka elérte célját. Ezt a jelölt rotációs esztergálásra alkalmazott modellezéssel, a forgácsleválasztást befolyásoló paraméterek megadásával és pontos számítására alkalmas összefüggések meghatározásával és azok hatásának elméleti és kísérleti összehasonlító elemzésével elért eredményei bizonyítják.

A kutatás során nyert, értekezésben bemutatott új eredmények a jelölt saját eredményei, melyeket rendszeresen ismertetett elismert hazai és nemzetközi konferenciákon és folyóiratokban.

Sztankovics István elvégzett kutatómunkájával és PhD értekezésének elkészítésével igazolta kiváló elméleti és gyakorlati felkészültségét és alkalmasságát önálló tudományos munka végzésére.

Az előzőek alapján az értekezés elfogadását és sikeres védelem esetén a PhD fokozat odaítélését messzemenően támogatom.

Miskolc, 2022. 02. 24.

Prof. Dr. Kundrák János
professor emeritus
tudományos vezető

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Az értekezés a Sályi István Gépészeti Tudományok Doktori Iskola keretein belül a „Rotációs esztergálással végzett precíziós befejező megmunkálás vizsgálata” témájú kutatómunkámat foglalja össze, melyet a Miskolci Egyetem Gyártástudományi Intézetében végeztem el.

Kiemelten mondok köszönetet témavezetőmnek, Prof. Dr. Kundrák Jánosnak, aki elindított a forgácsolásméleti kutatásokban. Tudományos munkámat szakmailag és emberileg maximális profizmussal irányította, megteremtette a kutatásomhoz szükséges tárgyi és technikai háttérrel. Segítette az értekezés kidolgozásakor felmerült elméleti és gyakorlati kérdések megválaszolását. Támogatta tudományos fejlődésemet, valamint lehetőséget teremtett eredményeim közzétételére belföldi és külföldi publikációk, cikkek és konferenciárésztvételek formájában.

Köszönettel tartozom a Miskolci Egyetem Gyártástudományi Intézetének jelenleg aktív és korábbi munkatársainak. Köszönöm intézetvezetőmnek, Dr. Maros Zsoltnak kutatásom támogatását és ösztönzését. Külön köszönöm Dr. Deszpoth Istvánnak és Dr. Szűcs Jánosnak a szakmai konzultációkat, a kutatómunkám során felmerült kérdésekben hozzájuk is fordulhattam. Köszönöm Pásztor Istvánnak, Süveges Bélának és Tóth Attilának az aktív közreműködést az értekezéshez szükséges kísérleti munkámban.

Végezetül, de nem utolsó sorban köszönöm szüleim, feleségem és fiam ösztönzését és támogatását a doktori képzésem és kutatásom során.

ÉRTEKEZÉSBEN ALKALMAZOTT JELÖLÉSEK

Geometriai viszonyokat leíró paraméterek

a_w	– a szerszám és a munkadarab szimmetriatengelyének távolsága [mm]
r_s	– a szerszám burkolóhengerének sugara [mm]
d_s	– szerszámtátmérő [mm]
m_s	– a csavarvonalú él emelkedése [mm]
λ_s	– a szerszám terelőszöge [°]
κ_r	– főélelhelyezési szög [°]
L_s	– a szerszámél axiális vetületének hossza [mm]
r_m	– a munkadarab megmunkált (elkészült) felületének sugara [mm]
d_m	– a munkadarab megmunkált (elkészült) felületének átmérője [mm]
R_m	– a munkadarab megmunkálandó (kiindulási) felületének sugara [mm]
D_m	– a munkadarab megmunkálandó (kiindulási) felületének átmérője [mm]
L_m	– munkadarab megmunkálandó felületének hossza [mm]

Technológiai paraméterek

A_c	– forgácskeresztmetszet [mm ²]
a_p	– fogásmélység [mm]
v_c	– forgácsoló sebesség [m/min]
f_a	– axiális irányú előtolás [mm/ford.]
$f_{r,a}$	– körelőtolásból származó axiális irányú előtolás [mm/ford.]
$f_{v,a}$	– a szerszám axiális irányú sebességéből származó axiális irányú előtolás [mm/ford.]
t_f	– gépi főidő [s]
L	– a felületképző pont előtolás irányú elmozdulása a fogásban töltött idő alatt [mm]
i	– fogások száma [db]
b	– forgácsoló él fogásban lévő hossza (forgácsszélesség) [mm]
h	– forgácsvastagság [mm]
h_e	– ekvivalens forgácsvastagság [mm]

Kinematikai viszonyokat leíró paraméterek

n_s	– a szerszám fordulatszáma [1/min]
n_m	– a munkadarab fordulatszáma [1/min]
ω_s	– a szerszám szögsebessége [1/s]
ω_m	– a munkadarab szögsebessége [1/s]

$v_{f,a}$	– a szerszám axiális előtoló sebessége [mm/min]
$v_{f,t}$	– a szerszám tangenciális előtoló sebessége [mm/min]
$v_{s,a}$	– a szerszám kiegészítő tengely irányú előtoló sebessége [mm/min]
t	– az idő paramétere [s]
v_m	– a munkadarab kerületi sebessége [mm/min]
$v_{m,t}$	– a munkadarab kerületi sebességének érintőirányú komponense forgó dolgozórészű szerszámnál [mm/min]
$v_{m,a}$	– a munkadarab kerületi sebességének tengelyirányú komponense forgó dolgozórészű szerszámnál [mm/min]
$v_{f,i}$	– a szerszám gép (interpolációból adódó) előtolási sebessége [mm/min]

A matematikai leírásban alkalmazott jelölések

1	– felületképző pont, a forgácsoló él és az alapsík metszéspontja
x_i	– a munkadarab és a szerszám álló koordináta-rendszerének x tengelye ($i = m, s$)
y_i	– a munkadarab és a szerszám álló koordináta-rendszerének y tengelye ($i = m, s$)
z_i	– a munkadarab és a szerszám álló koordináta-rendszerének z tengelye ($i = m, s$)
ξ_i	– a munkadarab és a szerszám mozgó koordináta-rendszerének ξ tengelye ($i = m, s$)
η_i	– a munkadarab és a szerszám mozgó koordináta-rendszerének η tengelye ($i = m, s$)
ζ_i	– a munkadarab és a szerszám mozgó koordináta-rendszerének ζ tengelye ($i = m, s$)
$K_{i,a}$	– a munkadarab és a szerszám álló koordináta-rendszere ($i = m, s$)
$K_{i,m}$	– a munkadarab és a szerszám mozgó koordináta-rendszere ($i = m, s$)
$R_{sa,sm}$	– a szerszám mozgó és álló koordináta-rendszere ($K_{s,m} \rightarrow K_{s,a}$) közötti elfordulást (rotációt) értelmező mátrix
$R_{ma,sa}$	– a szerszám és a munkadarab álló koordináta-rendszere ($K_{s,a} \rightarrow K_{m,a}$) közötti elfordulást (rotációt) értelmező mátrix
$R_{mm,ma}$	– a munkadarab álló és mozgó koordináta-rendszere ($K_{m,a} \rightarrow K_{m,m}$) közötti elfordulást (rotációt) értelmező mátrix
$t_{sa,sm}$	– a szerszám mozgó és álló koordináta-rendszere ($K_{s,m} \rightarrow K_{s,a}$) közötti lineáris elmozdulást (transzlációt) értelmező vektor
$t_{ma,sa}$	– a szerszám és a munkadarab álló koordináta-rendszere ($K_{s,a} \rightarrow K_{m,a}$) közötti lineáris elmozdulást (transzlációt) értelmező vektor
$t_{mm,ma}$	– a munkadarab álló és mozgó koordináta-rendszere ($K_{m,a} \rightarrow K_{m,m}$) közötti lineáris elmozdulást (transzlációt) értelmező vektor
r_{sm}	– a szerszámél egyenlete a szerszám mozgó koordináta-rendszerében
r_{sa}	– a szerszámél egyenlete a szerszám álló koordináta-rendszerében
r_{mm}	– a szerszámél egyenlete a munkadarab mozgó koordináta-rendszerében
r_{ma}	– a szerszámél egyenlete a munkadarab álló koordináta-rendszerében
l_m	– álló és mozgó koordináta-rendszerek kiindulási távolsága [mm]
p	– a csavarvonal paramétere

Jelölések a forgácsjellemzők meghatározásánál

A pont	– a forgácsolt és a megmunkált felület metszéspontja
B pont	– a forgácsolt és a megmunkálandó felület metszéspontja
A' pont	– az A pont egy előtolásnyi tengelyirányú translációjával kapott pont
B' pont	– a B pont egy előtolásnyi tengelyirányú translációjával kapott pont
$\xi_{m,i}$	– az i pont ξ_m koordinátája a $K_{m,m}$ koordináta rendszerben ($i = A, B, A', B'$)
$\zeta_{m,i}$	– az i pont ζ_m koordinátája a $K_{m,m}$ koordináta rendszerben ($i = A, B, A', B'$)
ζ_k	– a keresőegyenes ζ_m koordinátája
A_c^{ij}	– forgácskeresztmetszet, ahol: $i = K$ (Bekezdési), F (Befejező), $j = 1 - 4$ [mm ²]
b^{ij}	– forgácsszélesség, ahol: $i = K$ (Bekezdési), F (Befejező), $j = 1 - 4$ [mm]
Φ	– összefüggésekben alkalmazott egyszerűsítő paraméter [rad]

A hatékonyság elemzésénél alkalmazott jelölések

A_m	– felületképzési sebesség [cm ² /s]
Q_m	– anyagleválasztási ráta [cm ³ /s]
t_1	– a Bekezdési szakasz kezdetének időparamétere [s]
t_2	– a Bekezdési szakasz végének időparamétere [s]
t_3	– a Befejező szakasz kezdetének időparamétere [s]
t_4	– a Befejező szakasz végének időparamétere [s]
ϑ_i	– a szerszám szögelfordulása ($i = k, áll, f$) [°]
L_i	– a felületképző pont tengelyirányú munkautja ($i = k, áll, f$) [mm]
t_i	– a Bekezdési, Állandósult és Befejező szakaszhoz tartozó idő ($i = k, áll, bf$) [s]
Θ	– összefüggésekben alkalmazott egyszerűsítő paraméter [rad]

A felületminőség meghatározásánál alkalmazott jelölések

$\bar{\xi}_m$	– az alapvonal helyzete ξ_m irányban
$\xi_{m,a}$	– az alapvonal és a forgácsolt felület metszéspontjának ξ_m koordinátája
R_a	– átlagos érdesség [μm]
R_z	– egyenetlenség-magasság [μm]
R_{max}	– maximális érdesség [μm]
R_p	– az érdességi profil legnagyobb csúcsának magassága [μm]
R_v	– az érdességi profil legmélyebb árkanak mélysége [μm]
R_{sm}	– közepes barázdaszélesség [μm]
S_a	– az elemzett terület átlagos érdessége [μm]
S_z	– az elemzett terület maximális érdessége [μm]
DP	– sodrat periódushossza [mm]

$D\gamma$	– sodrat emelkedési szöge [$^{\circ}$ ' '']
Dt	– sodrat mélysége [μm]
DG	– sodrat spirálok száma [db]
DF	– sodrat elméleti keresztmetszete [μm^2].
$v_{t,e}$	– eredő tangenciális előtolás [mm/min]

A kísérleteknél alkalmazott jelölések

X	– a szerszámgép x tengelye a munkaasztal síkjában
Y	– a szerszámgép y tengelye a munkaasztal síkjában
Z	– a szerszámgép z tengelye a munkaasztal síkjára merőlegesen
M	– munkadarab
S	– szerszám
K_m	– munkadarabbefogó készülék
K_s	– szerszámbefogó készülék
R_{13}	– $13,45^{\circ}$ terelőszöggel rendelkező szerszám
R_{15}	– 15° terelőszöggel rendelkező szerszám
R_{30}	– 30° terelőszöggel rendelkező szerszám
R_{45}	– 45° terelőszöggel rendelkező szerszám
R_{50}	– 50° terelőszöggel rendelkező szerszám
$CNMG$	– hosszesztergáláshoz alkalmazott szerszám
F	– forgácsolóerő [N]
F_i	– i irányába ható erő ($i = x, y, z$) [N]
$F_{i,t}$	– az i irányú erő körmozgásra tangenciális komponense ($i = x, y, z$) [N]
$F_{i,r}$	– az i irányú erő körmozgásra radiális komponense ($i = x, y, z$) [N]
F_c	– főforgácsolóerő (a körmozgásra tangenciális) [N]
F_p	– tengelysíkban ható „passzív” erő (a körmozgásra tangenciális) [N]
F_f	– előtolás irányú erő (az előtolással párhuzamos irányú erő) [N]
k_i	– az i erő fajlagos értéke ($i = c, p, f$) [N/mm^2]
$\Delta F_i/dt$	– az i erő idő szerinti első deriváltja ($i = c, p, f$) [N/s]
$f_{a,h}$	– a megmunkált felület érdességében a szerszámgeometria döntővé válásához szükséges minimális előtolás [mm/ford.]
R^2	– determinációs együttható, a függvényilleszkedés jóságát kifejező paraméter [-]
R_i (mért)	– az érdességi paraméter mért értéke ($i = a, z$) [μm]
R_i (számított)	– az érdességi paraméter számított értéke ($i = a, z$) [μm]
R_i (korrigált)	– az érdességi paraméter számított értéke ($i = a, z$) [μm]
A, B, C	– a terelőszög és az előtolás mért érdességre gyakorolt hatását kifejező állandók [-]
D	– a számított érdesség korrekciós együtthatója [-]

BEVEZETÉS

Disszertációm témája a rotációs esztergálással végzett precíziós befejező megmunkálás vizsgálata. Ez a megmunkáló eljárás a J.G. Weisser Söhne GmbH & Co. KG szerszámgépgyártó vállalat 2004-ben benyújtott szabadalma, és különleges kinematikai és geometriai viszonyok alkalmazásával igyekszik a hagyományos hosszolótólós esztergálás hátrányait kiküszöbölni. Munkámban a célom az eljárás elméleti és kísérleti vizsgálata.

Vizsgálataimat a külső hengeres felületek határozott élű szerszámmal végzett, hagyományostól eltérő megmunkálásainak áttekintésével kezdem. Ennek során megvizsgálom az egyenes vonalú és körrelőtölést alkalmazó eljárásokat. Irodalomkutatótást végzek ebben a kutatási irányban annak érdekében, hogy felmérjem a hazai és nemzetközi eredményeket. Elhelyezem a rotációs esztergálást a fenti megmunkálások között, valamint ismertetem az eljárás általános jellemzőit, kinematikáját és a technológiai paramétereket.

Disszertációmiban a kinematikai alapú matematikai-analitikai modellt használva végzem el az elméleti vizsgálatokat. Ehhez meghatározom a rotációs esztergálás matematikai modelljét, a szerszáml vektoregyenletét, a koordináta-rendszerek transzformációjához szükséges egyenleteket, valamint ezek segítségével a megmunkált felületet leíró egyenleteket.

A matematikai alapok kidolgozását követően a forgácsot jellemző paraméterek vizsgálatom. Értelmezem a forgácskeresztmetszetet, a forgácsszélességet, a forgácsvastagságot, valamint meghatározom számítási módjukat az anyagleválasztás jellegzetes szakaszaiban. Vizsgálatokat végzek a rotációs esztergálást jellemző paraméterek hatására a felsorolt jellemzőkre.

Kutatómunkámat az anyagleválasztás hatékonyságának vizsgálatával folytatom. Megvizsgálom a megmunkálás gépi főidejét és meghatározom számítási módját. Emellett értelmezem a felületképzési sebesség és az anyagleválasztási ráta összefüggéseit rotációs esztergálás esetére. Összehasonlító elemzést végzek a geometriai és technológiai adatok hatásának megismerésére a hatékonyság jellemzőire.

Befejező megmunkálásról lévén szó, elengedhetetlen a felületi topográfia vizsgálata. Meghatározom az érdességet és a hullámosságot jellemző paraméterek elméleti értékeit az eljárást jellemző paraméterek függvényében. Emellett megvizsgálom a forgácsolási adatok hatását az elméleti érdességi profilra és a sodratot jellemző értékekre.

Disszertációm a fenti elméleti analízist követően kísérleti vizsgálatokkal fejezem be. Ennek során feltárom, hogy az elméleti és a valóságos értékek hogyan viszonyulnak egymáshoz különböző technológiai adatok esetén.

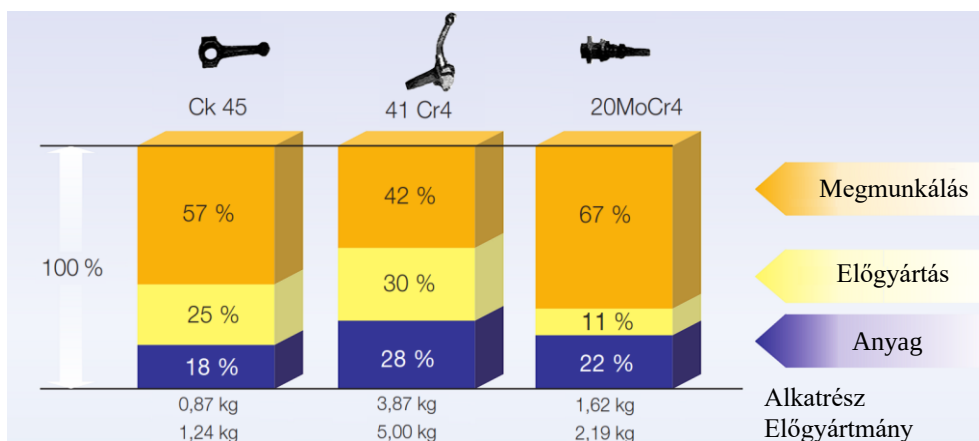
1 SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS, TUDOMÁNYOS ELŐZMÉNYEK

Értekezésem első fejezetében bemutatom a forgácsoló eljárások helyét a gyártási folyamatban. Áttekintem a szerszámgépek és azon belül az esztergagépek fejlesztésének fontosabb állomásait. Részletezem a napjainkban befejező megmunkálásként alkalmazható korszerű, nagy termelékenységgű esztergáló eljárások jellemzőit. Végül az értekezésben is alkalmazott matematikai módszer, a gyártásgeometria fejlődését mutatom be.

1.1 Forgácsoló eljárások helye a gyártási folyamatokon belül

A késztermékek előállítása során szembe kell nézni a globális piacok változása miatt a növekvő termelékenység, gazdaságosság, rugalmasság és minőség követelményeivel [1]. A gyártási folyamatokat felépítő tevékenységek, természeti és tudati folyamatok közül a technológiai folyamatok azok, melyek a késztermék minőségét érdemben befolyásolják. Ezért a megváltozott igények teljesítésének kiemelt fejlesztési területe az előgyártás, az alkatrészgyártás és a szerelés műveleteinek javítása [2]. Az összeszerelés költség- és időarányát elsősorban az előállított alkatrészek pontossága befolyásolja. Ezért az alkatrészek gyártásának pontosabbá és gazdaságosabbá tétele a teljes gyártási folyamatot javítja.

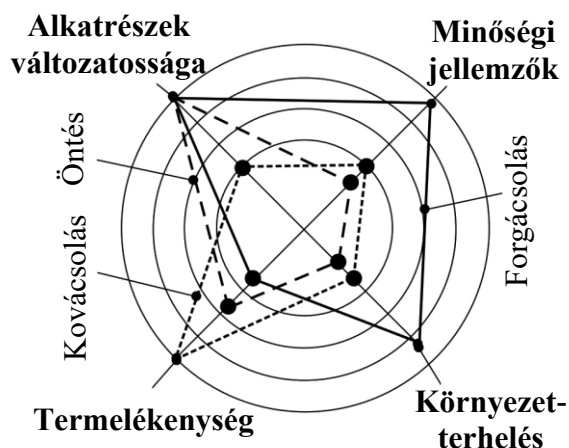
Az 1.1. ábra néhány, az autópárhánban jellegzetesen sorozatgyártott alkatrész költségmegoszlását mutatja. A példákól látható, hogy a teljes gyártási költség 42-67%-át teszi ki a különféle megmunkáló eljárások. Ezzel szemben az előgyártás költsége 11-30%, a munkadarabok anyagköltsége 18-28% részt jelent [3]. Vagyis az alkatrészgyártásnál a különféle megmunkálásoknak jelentős befolyásoló hatása van a gazdaságosságra. Ugyanakkor a megmunkáló eljárásokkal szembeni elvárások folyamatosan változnak, melyek közül egyre több területen alkalmazásszinten is használható válaszok születnek a különböző műszaki tudományokban végzett kutatásoknak köszönhetően.



1.1. ábra. Különböféle autópárhán alkatrészek (hajtórúd, kormánycsukló, hajtóműtengely) előállítási költségének megoszlása [3]

A megmunkálás során biztosítani kell az eltérő geometriai méretű, alakú és anyagminőségű alkatrészeknél [1] a rajzon előírt pontossági kritériumok (alak-, méret-, helyzetpontosság és felületi minőség) teljesülését. Ugyanakkor az egyes gyártmányokkal szembeni követelmények egyre szigorúbbakká válnak a minőségi elvárások változásával [4], ezért a gyártáskor alkalmazott technológiáknak – forgácsolás, képlékenyalakítás, hőkezelés, stb. – is fejlődniük kell a megváltozott követelmények eléréséhez.

A szabvány [6] szerint a megmunkáló eljárásokat 6 főcsoportra bontjuk: alaklétrehozás, képlékenyalakítás, szétválasztás, egyesítés, bevonás, anyagtulajdonság változtatás. Az 1.1. ábrán bemutatott munkadarabok tömege a technológiai folyamat kezdete és vége között számottevően (23-30%-kal) csökken. A gazdaságosság javításának módja az eltávolítandó anyagréteg csökkentése (az előgyártási technológiák fejlesztésével) mellett a ráhagyásalakzat hatékonyabb eltávolításának lehetővé tétele, vagyis a megmunkáló eljárások közül az anyagszétválasztás fejlesztése. Ezen belül legjelentősebbek a különféle határozott és határozatlan élgeometriájú szerszámmal végzett forgácsoló eljárások [7]. Néhány megmunkáló eljárás főbb jellemzőit az 1.2. ábrán mutatom be. Öntéssel és kovácsolással a forgácsolásnál jellemzően nagyobb termelékenység érhető el, azonban az alkatrészekről elvárt rajzi előírások (minőségi követelményeket) eléréséhez különféle forgácsoló eljárásokat kell alkalmazni. Forgácsoló eljárásokat széles ISO minőségben (IT2-14) és gyártási formában (egyedi-, sorozat- és tömeggyártás) alkalmaznak. A forgácsoló eljárások nagy előnye, hogy az előállítható formák alig korlátozottak, mivel általában nem alakfüggőek az alkalmazott szerszámok. Így a kovácsoláshoz képest nagyobb rugalmasság jellemzi. Ugyanakkor a forgácsleválasztás miatt keletkező hulladékanyag miatt nagyobb környezetterhelést jelent [5]. Ezt figyelembe véve a különféle forgácsoló eljárásoknak elsősorban a termelékenység növelésében és a környezetterhelés csökkentésében kell fejlődniük.



1.2. ábra. Megmunkálások összehasonlítása [5]

Az alkatrészfelületek adott szintű pontosságának elérésén túl a megmunkáló eljárásoknak gazdaságossági és energiahatékonysági kritériumokat is el kell érni [8]. Ezen elvárások teljesítésénél fellépő nehézségekre rámutatott kísérleteiknél Khan és kutatótársai is a hatékonyság elemzésénél, mivel a technológiai adatok megválasztásánál a termelékenység mellett a szerszámkopás költségvonzatát is figyelembe vette [9]. De a hatékonyságot befolyásolja a megmunkálási idő összetevőinek aránya is [10]. A gépi idő kedvezőbben kihasználható többek között a mozgásviszonyok módosításával [11], a mellékmozgások és a szerszámcserek minimalizálásával [12], a megmunkáló eljárások kinematikai változtatásával.

Az utóbbi évtizedek minőségi követelményeinek kielégítésére irányuló fejlesztéseknek köszönhetően megfigyelhető, hogy a korábban finommegmunkálással elérhető pontosság mára hagyományos eljárással (akár nagyolással) is elérhetővé vált [13]. Ennek köszönhetően nagymértékben csökkenthetők a gyártási költségek és emellett a termelékenység is javítható. Az elmúlt időszakban új megmunkálási stratégiák jelentek meg, mint a nagysebességű forgácsolás, kemény- és szárazmegmunkálás, valamint a folyamatintegráció [14].

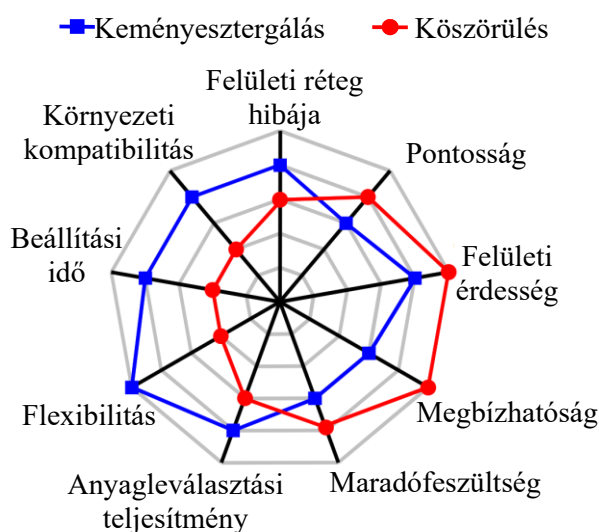
A forgácsoló eljárásoknak is folyamatosan meg kell újulniuk, hogy lépést tudjanak tartani a folyamatosan változó igényekkel [15]. A megváltozott minőségi előírásokat a

kutatók többféle megközelítéssel is elérhetik, melyek közül egy lehetséges csoportosítás szerint az alábbi három mód emelhető ki a megmunkáló eljárásoknál:

- az eddig alkalmazott eljárásoknál a megmunkáló és forgácsoló rendszer egyes elemeinek fejlesztése (például a szerszám forgácsolóképesége [16], a szerszám gép merevsége [17], befogórendszer [18], hűtő-kenő anyagok [19], stb.)
- a mozgásvizonyok nagyobb választási lehetőségének megteremtése (például módosított forgácsoló és/vagy előtoló mozgások [20], újszerű élgeometria alkalmazásával [21])
- új eljárások kifejlesztése, gyártási környezetbe implementálása (pl. additív gyártástechnológia [22])

A forgácsleválasztás történhet határozott és határozatlan élgeometriájú szerszámmal. Előbbi esetben meghatározott számú (egy- vagy többélű), geometriájú és viszonylagos helyzetű éllel rendelkező szerszámmal távolítjuk el a felesleges anyagréteget [24]. Határozatlan élű szerszámnál rendezetlen, statisztikai paraméterekkel jellemezhető eloszlással elhelyezkedő kemény anyagminőségű szemcsék mikroforgácsolás útján távolítják el a kijelölt anyagmennyiséget [25]. A kis fogásoknak köszönhetően finom felület érhető el [26]. Az előbbieket összehasonlításra példaként látható az 1.3. ábrán kemény felületek határozott (esztergálás) és határozatlan (köszörülés) élű szerszámmal végzett befejező megmunkálásainak jellemzői. Az ábrán a középponttól távolabb elhelyezkedő pontok kedvezőbb hatást jelentenek. A határozott élű megmunkálás legfontosabb előnyei a rugalmasság, az alacsony környezetterhelés, a beállításhoz szükséges kis időszükséglet és a nagy anyagleválasztási teljesítmény. Az abrazív megmunkálással viszont jobb pontosság és felületi minőség érhető el, valamint a folyamat is megbízhatóbb lesz a sokélű szerszámmal végzett megmunkálás miatt [23]. A kétféle megmunkálás különbözőségét mutatta meg Grzesik és társai is, miszerint kísérleteik során közel egyforma átlagos érdesség mellett ($S_a = 0,28 \mu\text{m}$) esztergálásnál kedvezőbb hordfelület alakul ki, ugyanakkor a köszörült felület folyadéktartó képessége kedvezőbb lesz [27]. Az abrazív eljárásokkal szembeni viszonylag nagy számú előny miatt érdemes a határozott élű szerszámok alkalmazásának kiterjesztésével foglalkozni a pontossági és a felület minőségi mérőszámok javításán keresztül.

A határozott élű szerszámmal történő forgácsleválasztást a szabvány [7] az alkalmazott géptípusok szerint csoportosítja, melyek jellegzetes geometriát hoznak létre. Ezek közül a megmunkált alkatrészek geometriája és az alkalmazott gépek száma alapján a három legnagyobb csoport: esztergálás (forgásszimmetrikus, általában külső felületek létrehozása), furatmegmunkálás (belső hengeres felületeket megmunkálása), marás (síkfelületek és különféle geometriájú alakos felületek forgácsolása). A három terület közül a következőkben az esztergálással foglalkozom részletesebben a megmunkálható alkatrészek sokfélesége és jelentősége miatt (tengelyek, tárcsák, különféle fogazott alkatrészek stb.).



1.3. ábra. Kemény felületek köszörülésének és esztergálásának összehasonlítása [23]

1.2 A forgácsoló szerszámgépek és az esztergálás

A gőzgépek megjelenése és elterjedése az I. ipari forradalom alatt az alkatrészek hatékony megmunkálására képes szerszámgépek kifejlesztésének és gyártásának kezdetét is jelentette az 1800-as évek elején. Az 1860-as évekig megoldódott az egyszerű alakú, öntött és kovácsolt vas, valamint néhányféle rézötvözet anyagminőségű gyártmányok forgácsolása a hagyományos eljárások kialakulásával. Az 1880-as évektől az elsődleges cél az újonnan megjelenő anyagok gazdaságos megmunkálása. Ehhez korábban még nem alkalmazott szerszámanyagokat fejlesztettek ki, a szerszámgépgyártóknak pedig olyan gépeket kellett tervezni, melyek hatékony megmunkálásra képesek az újfajta munkadarab és szerszámanyagok esetén [28]. Az 1900-as évek kezdetén a bérköltségek növekedése a mechanikus automatizálást serkentették [28]. Az 1950-es éveket követően a számítástechnika fejlődése és az NC majd CNC technológiák megjelenése lehetővé tette a gyártmánypontosság és a felületi minőség javítását [29]. Az automaták, CNC gépek és anyagmozgató gépek kifejlesztése és alkalmazása nagyobb kihozatalt is eredményezett. A fejlődés eredményeként a forgácsoló szerszámgépek nagyobbá és robusztusabbá válásával javult a merevség és így a pontosság is. Az 1990-es években a rajzi előírások teljesítésén túl a cél nagy termelékenység elérése és komplex darabok megmunkálásának lehetővé tétele egy gépen [30]. Az informatika és a mechatronika fejlődésével az integrált gyártórendszerek is megjelentek, ahol a gépek nem különálló egységeket jelentenek, hanem gépekből álló cellákat és gyártórendszereket alkotnak [28]. A modern korban a megmunkálandó alkatrészek anyaga nagyobb keménységű és/vagy szilárdságú, vagyis nehezebben forgácsolható. Ezek megmunkálására alternatívaként forgácsleválasztás nélkül dolgozó, különleges gyártástechnológiák jelentek meg [29].

A növekvő termelékenységi, rugalmassági és gyártmányminőségi elvárásokkal szemben a szerszámgépek fejlesztésének fő irányai az utóbbi évtizedekben a következők voltak [1]:

- nagyteljesítményű és -fordulatszámú főorsók alkalmazása,
- újszerű fő- és mellékajtások applikálása,
- gördülő vagy golyós konstrukciójú lineáris vezetékek beépítése,
- innovatív mozgásvizonyú koncepciók megvalósítása,
- szenzorok és aktuátorok alkalmazása a folyamatstabilitás növelésére.

A hagyományos megmunkálások fejlődésének egyik lehetséges iránya az eljárások kombinálása [29]. Többféle eljárás egy gépen való integrálásával a megmunkálási idők és az anyagmozgatás is csökkenthetők az egy befogásban és/vagy gépen való megmunkálás lehetővé tételével. Byrne társaival a folyamatintegráció 5 szintjét mutatta be [1]:

- különféle eljárások (esztergálás, marás stb.) megvalósítása egy gépen,
- úgynevezett „hat oldalas” megmunkálás lehetőségének megteremtése,
- párhuzamos megmunkálás (1 gépen 2 vagy több egymástól független folyamat),
- hibrid megmunkálás (folyamatok összevonása, pl. lézerrel segített forgácsolás),
- integrált folyamatok (új eljárások hagyományos eljárások alapján, például köszörülő keményítés).

Egy adott eljárás fejlesztésekor a létrehozott új változat minden technikai lehetőségének kihasználásához komplex vizsgálatok szükségesek. Pontosan körül kell határolni a létrehozott felület alkalmazási lehetőségeit, korlátait [31]. A hatékony forgácsleválasztás tervezéséhez ismerni kell a folyamat jellemzőit, a forgácsképződés mechanizmusát [32]. A technológiai és a forgácsolási paraméterek pontos meghatározása szükséges, hogy a kutatás tárgyául szolgáló forgácsoló eljárást az adott területen alkalmazott más eljárásokkal összehasonlíthassuk.

Esztergálásnál a hagyományos esetekben a forgó főmozgást végző munkadarab mellett a szerszám tengely- vagy sugárirányú mellékmozgást végez [33]. Nagy előnye, hogy szabványosított egyélű szerszámokat használ, így a felületek mérete nem korlátozza alkalmazhatóságát. Ugyanakkor hátrányos tulajdonsága, hogy a folyamat során a forgácsoló él pontszerűen, kis szakaszon (szerszámcsúcs és környezete) érintkezik a munkadarab megmunkált felületével. Így a szerszám kopása ebben a pontban koncentrálódik, miáltal a szerszám éltartama erősen korlátozott [34]. Emellett a hőterhelés is ezen pont környezetében lesz a legnagyobb [35]. Fontos tulajdonság még, hogy hosszesztergálás esetén a kinematikai és geometriai viszonyok miatt a szerszám felületképző pontja a megmunkált felületen csavarvonalat ír le, periodikusan változó profilt létrehozva. Ezzel magyarázható, hogy az esztergált felület erősen anizotróp (a felület geometriáját leíró paraméterek az egyes irányokban mérve eltérőek), míg például a köszörült felület közelít az izotróp jelleghez [36].

Az esztergagépek esetén is az eddig leírt fejlődési folyamat figyelhető meg. A technika fejlődésével az alábbi géptípusok kerültek eddig a gyártási környezetbe implementálásra [37]:

- hagyományos esztergagépek,
- vezérléssel, előre programozott szubrutinokkal illesztett gép,
- rugalmas gyártórendszerhez alkalmazkodó teljesen integrált CNC esztergagépek,
- tömeggyártásnál automata esztergák és célgépek,
- kis- és középsorozat gyártásnál esztergaközpontok alkalmazása,
- függőleges tengelyű esztergagépek kis- és nagyméretű darabok megmunkálására.

Napjainkban az esztergagépek esetében a nagy teljesítményű CNC esztergák és az esztergaközpontok fejlesztése és ipari környezetben való alkalmazása terjedt el [38]. Utóbbiak többféle feladatot is képesek ellátni a hajtott szerszámok nagyfokú alkalmazásával [39]. Az esztergaközpontok megvalósítása a 2000-es évek legfontosabb fejlesztése, mivel lehetővé teszi bonyolult alkatrészek komplex megmunkálását. A piaci igényt egyre inkább a kisebb darabszám és a nagyobb gyártmányféleség jellemzi. Az esztergaközpontok alkalmazásával a gépek száma és így a beállítási idők csökkennek, nő a gépkihasználat és a rugalmasság [38].

A másik kiemelt fejlesztési irányt jelentő nagy teljesítményű esztergagépeket kompakt elrendezés, minimális helyigény jellemzi. Általában 1–2 főorsó, valamint 2, vagy több revolverfej található ezeken. Így minimalizálható a gépi idő és növelhető a termelékenység. A szerszámtartóban elhelyezett hajtott szerszámmal alapszintű marási és fúrási műveletek elvégzésére is képesek. A konstrukciót nagysebességű főorsó és mellékmozgást végző egységek jellemzik [38]. A munkadarabok helyzetváltoztatásának és megfogásának kiemelt jelentősége van. A vertikális főorsójú gépek 1990-es években történt kiterjedt alkalmazásával a főorsó végzi a munkadarabok manipulálását (például az EMAG [40], a WEISSER [41] és a HESAPP [42] megoldásai). Ezzel a leválasztott forgács elvezetése is javult.

1.3 Nagy termelékenyséű, befejező esztergáló eljárások

Az esztergálás fejlesztési területei közül a nagy termelékenységgel és a befejező eljárásoktól elvárt felületminőséggel jellemezhető azon eljárásokkal foglalkozom, melyek közös tulajdonságai a hosszelőtolásos esztergálástól eltérő geometriai viszonyok. A megmunkálási folyamatra jelentős hatással van az alkalmazott szerszám élkialakítása [43], mivel a generált felület mikro- és makrogeometriáját, a forgácskeresztmetszetet és az által a forgácsoló erőt közvetlenül befolyásolja a szerszám alakja, mérete és helyzete [33]. Ezáltal az élgeometria közvetve befolyásolja a gyártás termelékenységét és a megmunkált felület

minőségét. Ebből kifolyólag a meglévő eljárások geometriai viszonyainak (és ezzel együtt szükség szerint a kinematikájának) módosításával kis változtatás mellett nagy eredményt lehet elérni [44]. A terelőszög növelésével a hagyományos esztergáláshoz képest jobb felületminőség [45], kedvezőbb éltartam érhető el, csökkenhet a homloklap és a forgács közötti súrlódási tényező [32]. Hatékonyan javítható a forgácsoló erő komponenseinek aránya [46]. A nagy terelőszöggel ($\lambda_s > 10^\circ$) is alkalmazható eljárások közül részletesebben négyet mutatok be: hántoló esztergálás, esztergálás forgó dolgozórészű szerszámmal, tangenciális esztergálás, rotációs esztergálás (1.1. táblázat).

1.1. táblázat. A vizsgált eljárások

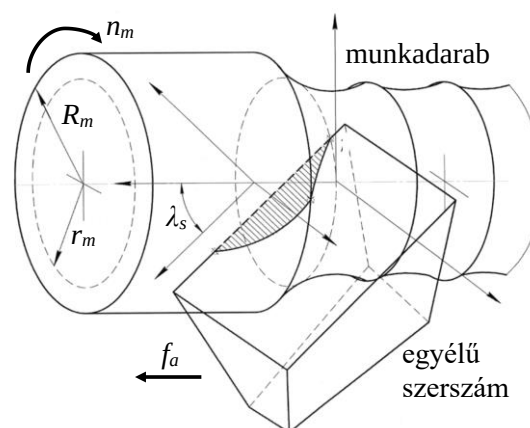
Eljárás	Eljárásváltozat	n_s	n_m	$v_{f,t}$	$v_{f,a}$	λ_s
Hántoló esztergálás	Főorsó tengellyel párhuzamos él	$= 0$	> 0	$= 0$	> 0	$= 0$
	Főorsó tengelyre kitérő helyzetű szerszámél					$\neq 0$
Forgó dolgozórészű szerszám	Szabadforgatású szerszám	> 0	$n_m \gg n_s$	$= 0$	> 0	$\neq 0$
	Kényszerforgatású szerszám	> 0				$= 0$
Tangenciális esztergálás	Főorsó tengellyel párhuzamos él	$= 0$	> 0	> 0	$= 0$	$= 0$
	Főorsó tengelyre kitérő helyzetű szerszámél					$\neq 0$
Rotációs esztergálás	Körelőtolás	> 0	$n_m \gg n_s$	> 0	$= 0$	$\neq 0$
	Kör és axiális előtolás	> 0	$n_m \gg n_s$	> 0	> 0	$\neq 0$

Az eljárások kinematikai adatait foglalja össze az 1.1. táblázat. Az esetek közül a szerszámnak körirányú mozgást a forgó dolgozórészű szerszám alkalmazása és a rotációs esztergálás esetén szükséges adni. Azonban a munkadarab fordulatszámához képesti lassabb forgó mozgás miatt állandó keresztmetszetű forgácsleválasztás alakul ki. Látható továbbá, hogy egyes eljárások megvalósíthatók zérus és nullától különböző terelőszöggel is, mellyel kedvezően befolyásolható a megmunkált felület érdessége nagy termelékenység mellett is.

1.3.1 Hántoló esztergálás

A hántoló esztergálással végzett megmunkálás és a kinematikai vázlata az 1.4. ábrán látható. A forgácsoló főmozgást a munkadarab, az előtoló mellékmozgást a szerszám végzi.

A hagyományos hosszesztergálástól való egyik eltérést a 0° -os főélelhelyezési szög jelenti, vagyis a szerszám élsíkja érinti a munkadarab megmunkált hengeres felületét. Ezáltal elméletileg elérhető a $0 \mu\text{m}$ -es érdesség. Viszont a forgácsleválasztás szempontjából nem lenne előnyös, ha az él párhuzamos lenne a munkadarab szimmetriatengelyével (például a rezgésveszély fokozódása miatt [47]). Ezért olyan változat terjedt el, ahol az egyenes élű szerszámot nullától jelentősen eltérő ($> 10^\circ$) terelőszöggel látják el. Így a szerszám axiális előtolása és a munkadarab forgó mozgása mellett az él folyamatosan lép be a munkadarab anyagába, míg végül elkészül a megmunkált felület. A hántoló esztergálás különleges geometriája miatt $R_a < 0,8 \mu\text{m}$ érdességű felület is elérhető [45], így jó alternatíva lehet befejező megmunkálásként való alkalmazásra is [48]. Ez annak köszönhető, hogy az él által súrolt forgácsolt felület szimmetriasíkbeli metszete egy erősen nyújtott hiperbola lesz, mivel a szimmetriatengely körül forgatunk meg egy hozzá képest kitérő egyenes.

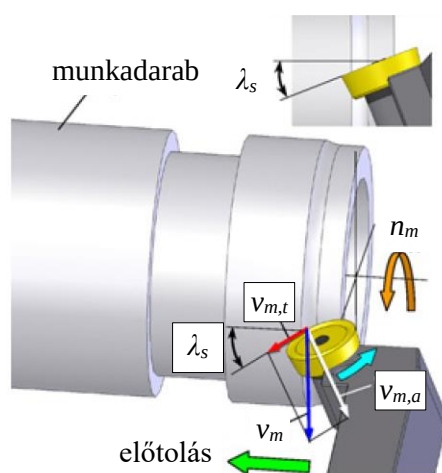


1.4. ábra. A hántoló esztergálás és kinematikai vázlata [45]

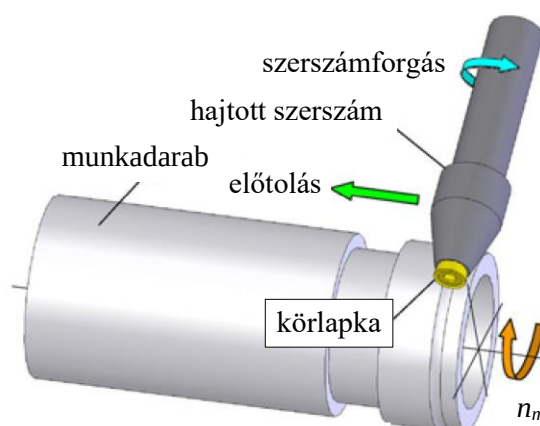
Többek között Klimenko és Manokhin is megmutatta [45], hogy az él terelőszögének növelésével a forgácsoló erő és a passzív erő csökkenthető, míg az előtolás irányú erő növekszik. Ez fontos szempont olyan eljárásoknál, ahol a radiális irányú (passzív) erőkomponens aránya a forgácsolóerőhöz viszonyítva nagy, például keményszertergálásnál az alkalmazott negatív homlokszög miatt [49]. Ugyanakkor hántoló esztergálásnál a terelőszög növelésével a forgácsolási hőmérséklet is nő, mert megnő az átlagos forgácsvastagság [45].

1.3.2 Esztergálás forgó dolgozórészű szerszámmal

A hántoló esztergálás speciális esetének tekinthető, amikor forgó dolgozórészű szerszámmal végezzük a forgácsolást, amelynek jellegzetes eseteit mutatja az 1.5. ábra. Ezeknél az egyenes vonalú él helyett körív geometriát alkalmazunk. A kör alakú forgácsoló lapka a szimmetriatengelye körül fordul el. Az elfordulás bekövetkezik a forgó munkadarabbal való érintkezésből származó súrlódás miatt (szabadforgatású), vagy külső hajtás (kényszerforgatású) is okozhatja [50].



Szabadforgatású dolgozó rész



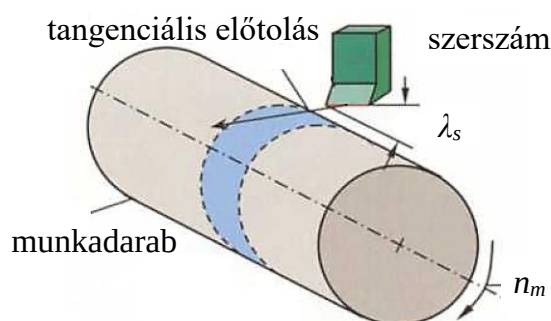
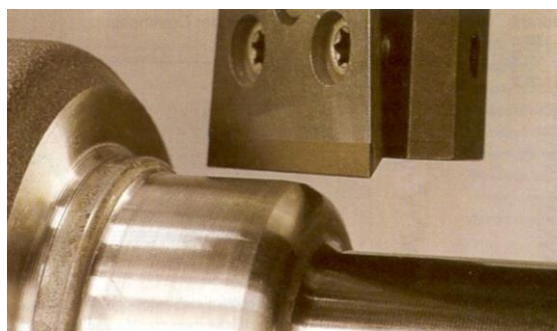
Kényszerforgatású dolgozó rész

1.5. ábra. Forgó dolgozórészű szerszámmal végzett forgácsolás jellegzetes esetei [51]

A szabadforgatású esetben a forgácsoló él a szimmetriasíkkal λ_s szöget zár be, emiatt a munkadarab kerületi sebességének (v_m) a körlapka síkjára merőleges komponense ($v_{m,a}$) mellett egy érintőirányú komponens ($v_{m,t}$) is megjelenik, amely a lapkát a tengelye körüli forgásra kényszeríti. A külső hajtású megoldásnál a forgó mozgást létrehozó motorhoz rögzített a szerszámszár, így 0° terelőszögű eset is lehetséges. Az 1.5. ábrán látható forgó szerszámú eljárásváltozatokkal a precíziós megmunkálásokra jellemző érdesség elérése mellett a műveleti idő és a teljesítményigény is csökkenthető [52]. Nieslony és kutatótársai munkájában [53] a felületi érdesség csökkenését mérték az előtolás és a forgácsoló sebesség növelésével, mivel így a forgácsolóerő periodikus változását csökkentették. Ugyanakkor Joch és szerzőtársai kutatásából kiderül, hogy az alkalmazott nagy előtolás miatt folyóforgács keletkezik, ezért megfelelő forgácsstörő alkalmazása célszerű [54]. Armarego elméleti [55] és kísérleti [56] munkája megmutatta, hogy a komplex geometriai viszonyok és kiegészítő mozgás jelenléte miatt nagyobb körültekintést igényel például a leválasztandó és a leválasztott forgács keresztmetszetének meghatározása. A gombakéssel végzett megmunkálásnál fellépő erőket az ún. vékony nyírási zóna modellel kapcsolta össze a hagyományos esztergálással és az eredményeket kísérleti úton is igazolta. A kényszerhajtásos szerszám esetén Olgun és Budak [57] megállapították, hogy a hagyományos hosszolótolásos esztergáláshoz képest jobb lesz a szerszámkopás, a kör alakú lapka teljes kerülete mentén dolgozik. Olgun megfigyelte, hogy a terelőszög növelésével – azaz a lapka dőlésének növelésével – javul az éltartam. Ugyanakkor a terelőszög befolyásolja a megmunkált felületi minőséget is. Mivel az alkalmazott szerszám alapsíkbeli vetülete ellipszisnek (a zérus terelőszögű speciális esetben körnek) tekinthető, ezért érhetőek el kis érdességi értékek. Azonban a terelőszög növelésével a profil szélessége egyre kisebb lesz, ezért megfigyelhető az érdességi paraméterek romlása. A fenti eredményeket is alátámasztják a Vasilko által végzett kísérletek [58]. Az alkalmazott lapka (szabad- vagy kényszerhajtásból eredő) forgó mozgása miatt a folyamat hőmérsékleti jellemzői is kedvezőbbek lesznek, mint hagyományos eljárásnál. Hosokawa és társai kutatásából kiderül [51], hogy kényszerhajtásos szerszám esetén a forgácsoló él hőmérséklete 25%-kal (115 C°) csökken egy körülfordulás során. A forgó kiegészítő mozgás miatt mindig a lapkának egy alacsonyabb hőmérsékletű része lép be a forgácsolási zónába, ugyanakkor az ebből a zónából kilépő élszakasznak a fogásból kilépve van ideje hűlni [59].

1.3.3 Tangenciális esztergálás

A külső hengeres felületek megmunkálására alkalmazott eljárások közül harmadikként a tangenciális előtolással végzett forgácsleválasztást elemzem [60]. Itt a szerszám konstrukciója mellett alkalmazott kinematika is eltér a hosszolótolásos esztergálástól (1.6. ábra). Ebben az esetben a szerszám a munkadarab megmunkált felületét érintő pályán halad.



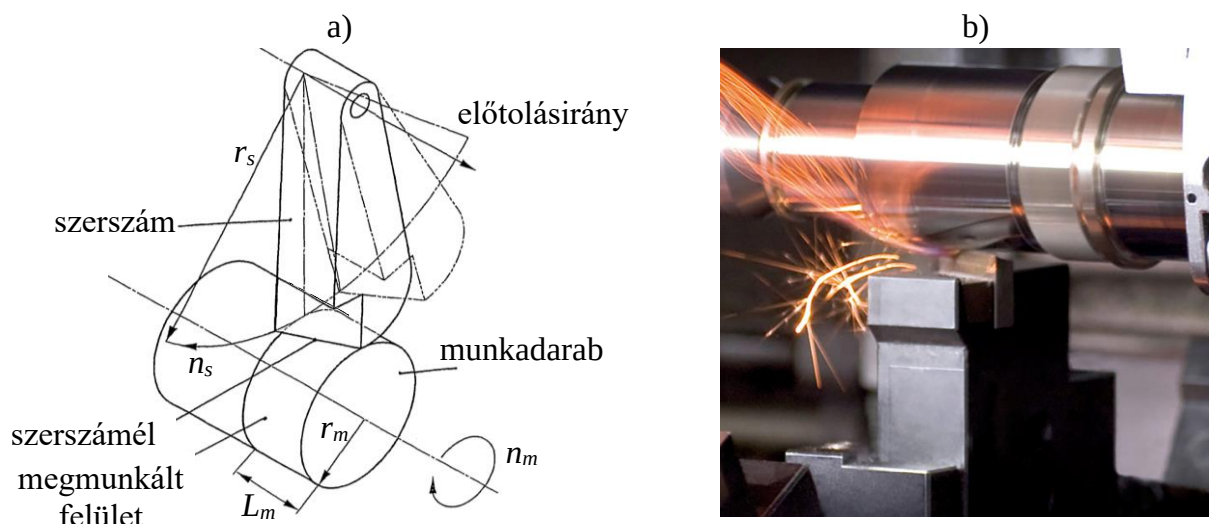
1.6. ábra. A tangenciális esztergálás és kinematikai vázlata [61]

A kinematika miatt ez a változat nem csak külső hengeres felületek, hanem alakos felületek megmunkálására is alkalmazható megfelelő élprofil mellett. Ebben az esetben a szerszámprofil geometriája a megmunkálni kívánt felület geometriájából számítható. Külső hengeres felület megmunkálása esetén azonban egyenes élű szerszám alkalmazandó. Itt is célszerű azonban ferde élhelyzetű szerszámot alkalmazni. A hagyományostól eltérő geometria és kinematika miatt az éltartam jelentősen javul, a szerszám éle minden pontján kopik, mint a gombakés eseténél. Nem koncentrálódik egy pontban, mint hagyományos hosszesztergálás esetén. Emiatt a folyamat hőmérsékleti jellemzői is jobbak lesznek, mivel a forgácsolási zónába mindig a szerszám alacsonyabb hőmérsékletű része kerül be. Mivel a mellékmozgás eltérő, ezért a szerszám gép szempontjából is eltérő követelmények szükségesek, például megfelelő merevségűnek kell lennie [62]. Ennek fő oka, hogy a megváltozott viszonyok miatt egyrészt a forgácsoló erő komponensei megváltoznak a hagyományoshoz képest; másrészt az egyszerre fogásban lévő hosszabb élszakasz miatt megnő a rezgésveszély. A megmunkálási pontosság is több tényezőtől függ [63], például a terelőszög mértékétől, a tangenciális előtolás nagyságától vagy a fogásmélység értékétől. Alkalmazható az eljárás sodratmentes felületek előállítására is [61]. Ennek oka, hogy a szerszám éle a megmunkálás folyamán végig érinti a munkadarab megmunkált felületének burkolóhengerét, így nagyon kis mértékű barázdamélység érhető el. Tömítőfelületek tangenciális esztergálással való megmunkálásának vizsgálatokor kielégítő eredmények születtek a szerszámkopás, az olajszivárgás és a költségek csökkentésében [64]. Próbálkoznak a kutatók a tangenciális előtolású esztergálás alkalmazására keményesztergálás esetén is [65], többek között az EMAG szerszámgépgyártó cégnek is van ilyen megoldása [66].

1.3.4 A rotációs esztergálás

Az eddig bemutatott eljárások előnyös tulajdonságaik mellett hátrányos tulajdonságaik miatt erősen korlátozott az alkalmazási területük. A hántoló esztergálásnak biztosítani kell szerszámkifutást, valamint a szerszám kopása és terhelése az él azonos szakaszán történik (mint hagyományos esetben). A forgó dolgozó részű szerszámmal végzett megmunkálás speciális konstrukciójú szerszámot igényel, a kör alakú lapka forgó mozgásának rezgésmentes biztosítása kiemelt feladat. Tangenciális előtolás esetén korlátozott a munkadarab megmunkálható hossza, valamint nem minden szerszám gép képes az érintő irányú mozgás biztosítására megfelelő merevséggel. A rotációs esztergálás [67] a németországi J.G. Weisser Söhne GmbH & Co. KG szerszámgépgyártó vállalat szabadalma [68], melyhez a speciális szerszámokat a MAS GmbH gyártja [69]. A koaxiális rotációs marás és a hántoló esztergálás egyesítésének tekinthető [70]. Az eljárással a precíziós megmunkálásokra jellemző szigorú előírásoknak is megfelelő felülettopográfia érhető el, így kiváltható a köszörülés [71], ezzel a gyártási láncok hossza csökkenthetők [72]. A forgácsképződés folyamata az diagonális forgácsoláshoz is hasonlítható [32]. A folyamatos anyagleválasztás és az anyagszerkezeti jellemzők miatt folyó forgács keletkezik [24].

A rotációs esztergálás geometriai és kinematikai viszonyait a 1.7. ábra alapján mutatom be. Az eljárás legfontosabb jellemzője az alkalmazott szerszám konstrukciója és az ebből adódó hagyományostól eltérő kinematikai viszonyok. A forgácsoló szerszám éle csavarvonal mentén helyezkedik el, amely görbének a középvonala párhuzamos a munkadarab forgástengelyével. A szerszámélhossznál rövidebb felületeknél körelőtolást, hosszabb felületeknél kör- és hosszelőtolást végez a szerszám. A forgácsoló sebesség a munkadarab forgó mozgásának kerületi sebessége. A fogásmélység a szerszám és a munkadarab tengelytávjának módosításával állítható be. A forgácsolás során az aktív élszakasz változtatja helyzetét a csavarvonalú élen.



1.7. ábra. A rotációs esztergálás kinematikai vázlata (a) [67] és szerszáma (b) [68]

A hazai kutatók közül Kundrák és kollégái a szerszám és a munkadarab normálmetszetében és az alapsíkban felírt jellegzetes élhelyzetek alapján határozták meg a szükséges szögelfordulás közelítő értékének számítási módját, amely alapján az eljárás termelékenységét elemezték [73]. Megállapították, hogy a hosszeltolós keményesztergálás reális alternatívája lehet edzett felületek megmunkálásánál. A geometriai elemzés alapján rámutattak a minimális eltávolítható anyagrétegvastagság befolyásoló szerepére a forgács szélesség és -vastagság arányának nagy értéke miatt [74]. A nemzetközi szakirodalomban viszonylag kevés számú publikáció áll rendelkezésre a rotációs esztergálásról, melyek témája többségében a megmunkált felület minősége. Klocke és munkatársai [70] az elméleti érdekesség meghatározására egy olyan összefüggést javasoltak, amelynél a szerszám alapsíkbeli vetületét egy kör geometriával közelítik, így visszavezetve az eljárást a rádiuszos lapkával végzett hosszeltolós esztergálásra. Kísérleti munkájukban azt tapasztalták, hogy az előtolás növelésével a szerszámgeometria hatása egyre jellemzőbbé válik. Az elméleti értékek az előtolás függvényében jól követik a mért értékek változását, azonban 0,4 mm/ford. előtoláson 60%-kal, míg 1,0 mm/ford. előtoláson 20%-kal kisebb értékeket számítottak. Degen és társai [75] kutatásukban a keményesztergálással való összehasonlítás során arra jutottak, hogy lényegesen kisebb érdesség érhető el rotációs esztergálásnál (10-15-öd része). Ugyanakkor a kis forgácsvastagság miatt a szerszám beremegését tapasztalták. Šajgalík és szerzőtársai [76] a maximális érdesség számítási módjához a csavarvonalú szerszám alapsíkbeli vetületét elemezték és trigonometrikus szögfüggvénnyel közelítették. A felírt trigonometrikus függvényből számították ki az elméleti megmunkált felület csúcsmagasságát. Martikan és kutatótársai [77] bemutatják az egyedileg tervezett hagyományos esztergára szerelhető hajtott szerszám befogó készüléket, amellyel a körreltolás biztosítható. Az elvégzett kísérletekben Mrazik és szerzőtársai [78] azt tapasztalták, hogy a munkadarab keménységének függvényében változik a Šajgalík és társai [76] által meghatározott érdességszámító képlet jósága. 50 HRC keménységnél 97%-os, 40 HRC keménységnél 61%-os, 60 HRC-esetén 27%-os pontosságot tapasztaltak. További kutatómunka végzését javasolják a számítóképlet pontosítására.

Ez az eljárás a határozott élű szerszámmal végzett forgácsolás néhány kérdésének megválaszolására adhat lehetőséget, olyan feladatok megvalósításának elérhetővé tételével, melyek jelenleg nehézséget jelentenek az alkatrészek befejező megmunkálásánál. Kihívást jelent a termelékenységgel és a felületminőséggel szembeni elvárások egy időben való teljesítése, mivel a gyártási idő csökkentése általában a felületet jellemző paraméterek

romlásához vezet, és fordítva. Az előbbieket mellett teljesíteni kell az alkatrészekkel szembeni egyéb rajzi előírásokat is, mint a különböző pontossági előírások vagy a működési követelményekből adódó elvárások. Az alakpontosság az esztergálás alkalmazására korlátozást jelent például hosszú, karcsú tengelyek kemény felületeinél. Ezen alkatrészeknél a negatív homlokszögű megmunkálásoknál nagy passzív erő és így a megmunkáló rendszer jelentős rugalmas deformációja jelentkezik. Ezért a kihajlás miatt egyélű szerszámmal hosszfelőtolással esztergálással gazdaságosan nem lehet nagy hossz/átmérő viszonyú tengelyeket megmunkálni, köszörülés alkalmazása szükséges. Másrészt a működési követelmények közé tartozik például a felületek sodratosságának egy megadott szint alatt tartása. Ez a követelmény olyan felületeknél fordul elő, amelyeknél a felületen képződő csavarvonalú periodikus topográfia problémát jelent (tömítések, tűgörgős csapágyak aktív felületei; sebességváltók szinkronizáló kúpjai).

1.4 Gyártásgeometriai módszer fejlődése

A szakirodalmi áttekintést az értekezésben alkalmazott matematikai módszer fejlődésének bemutatásával zárom. A csavarvonal mentén elhelyezkedő szerszámmal és a komplex mozgásviszonyok miatt a rotációs esztergálás matematikai leírásához és egzakt meghatározásához áttekintettem a különböző megmunkálási eljárásokra alkalmazott, az eljárások geometriai és kinematikai sajátosságait figyelembe vevő megoldásokat.

A matematika geometriai és analitikai eszközei különleges kapcsolódási esetek leírására hosszú idő óta alkalmazásra kerülnek a konstrukciós és a technológiai tervezésben. E területen a XIX. században két kutató eredményeit kell megemlíteni. A francia Olivier fogazatok kapcsolódásának leírásánál a burkolófelület előállításához származtatófelületet alkalmazott elsőként [79], míg Gohman analitikus modellen keresztül elemezte térbeli elrendezésű fogazott gépelemek kapcsolódását [80]. A kinematikai alapú meghatározás fontos alapja a csavarmozgás általános elméletének kidolgozása Ball által [81]. Distelli a hipoid kerekek mozgásátadásáról írt az általános csavarmozgás alapján [82]. Vizsgálta a kitérő tengelyvonalú fogaskerékpárokat is. Munkáját Wildhaber fejlesztette tovább az elmélet és a gyakorlat egymáshoz rendelésével, a mozgástanon alapuló módszert alkalmazva továbbfejlesztette a kapcsolódás elméletét [83]. Eredményeit a vektorszámítás módszerét alkalmazva Capelle fejlesztette tovább és részben általánosítja [84]. Altman a csavarfelületek és egyéb térbeli alakzatok leírásában geometriai szemléltetéssel mutatja be a matematikai analízis eredményeit és a kinematikai módszer alkalmazását [85]. A burkolófelületek görbületmeghatározásában és az ívelt csigahajtások leírásában jelentős eredményeket ért el Kolchin [86] és Krivenko [87]. Az alkatrészfelületek meghatározásában a nemzetközi irodalomban Litvin munkája alapműnek tekintendő, leírásában a differenciálgeometria és a kinematikai módszer együttes alkalmazásával bonyolult felületek is a gyakorlat számára könnyen meghatározhatóak [88]. A Perepelica által leírt módszerrel [89] az alakos szerszámok matematikai analitikai leírásán túl [90] az affin geometria alkalmazásával alkalmas a forgácsolás közbeni geometriai viszonyok meghatározására [91]. A szerszámmal mozgásának leírásával meghatározható a forgácsoló sebesség vektora [92], így többek között poligonfelületek megmunkálásánál alkalmas a működő szögek [93] és egyéb élgeometriai elemek [94] meghatározására. Hsieh megmutatta, hogy a homogén koordinátákkal a szerszámok forgácsolóképesége is könnyen jellemezhető [95], ugyanakkor koordinátamérőgépek programozására is használható [96]. A mozgástan alapú modellezés módszerével többek között 5D-s fogaskerék profilköszörű [97] valamint megmunkálóközpontok [98] geometriai hibájának számítása és korrigálása is lehetséges.

Számos magyar vonatkozású kutatás is megjelent az utóbbi évtizedekben a kinematikai módszer alkalmazására. Szeniczai a csigahajtóművekkel kapcsolatos kutatások egyik kezdeményezője, az elsők között javasolta a konjugált felületpárok alkalmazását [99]. Tajnafői az általa kidolgozott származtatáselméletét felhasználva a szerszám gép struktúra változatok képzésére új tervezési módszereket vezetett be [100]. Lévai kitérő tengelyű hajtópárok fogazáselméleti kérdéseit vizsgálta meg [101]. Drobni az ívelt profilú és a globoid csigahajtások elméletével foglalkozott, fontos eredményeket ért el a köszörülhető globoid csigahajtások esetén [102]. Siposs új típusú globoid csigahajtások gyártástechnológiájával foglalkozott [103]. Drahos szerszámgeometriák és csavarfelületek gyártásgeometriáját elemezte [104]. Bercsey a kinematikai módszert felhasználva meghatározta a globoid csigák kapcsolódási viszonyait [105], vizsgálta a toroidhajtásokat [106]. Dudás I. a kúpos és hengeres csigahajtópárok eleminek gyártásgeometriai vizsgálatára matematikai kinematikai modellt dolgozott ki [107] és kidolgozta a csavarfelületek gyártásának elméletét [108]. A csigahajtások, a csiga és csigakerék geometriai viszonyainak leírására általános matematikai modellt alkotott [109] és továbbfejlesztett [110]. Bányai a hengeres csigák geometriai leírásával és ellenőrzésével foglalkozott [111]. Csibi többek között mechanizmusok kinematikájával, különféle fogazatok hordkép-elemzésével foglalkozott [112]. Dudás L. az általa kidolgozott Elérési-Modell segítségével a csigahajtások elemeinek gyártási pontosságát vizsgálta, valamint újszerű köszörűgép-konstrukciót állított elő [113]. Pay a kinematikai módszerrel megalkotta a csigakerék középsíkjában elhelyezkedő egyenes alkotóval származtatott tetszőleges tengelyszögű belső csigás hajtások matematikai modelljét [114]. Horák nem vonalfelületű, térbeli fogazatok görbületi és sebességviszonyait vizsgálta az általa kifejlesztett, kinematikai módszerre alapuló, numerikus algoritmussal. Máté a Fellows típusú ferde fogú metszőkerekek geometriai és kinematikai paramétereit vizsgálta [115]. Balajti a kúpos és hengeres csigák gördülő felületeinek centrális kollineációs kapcsolatba helyezésével a kúpos csigaalak helyes gyártásgeometriáját írta le a továbbfejlesztett matematikai modelljében [116]. Kutatás indult a szerszámmél geometriai vizsgálat módszerének kidolgozására a Monge elv alapján [117] a Monge téglá kifejlesztésével [118]. Hegedűs a származtatáselméletet felhasználva golyósanyák köszörülésének leírására alkalmas matematikai modellt dolgozott ki a szükséges paraméterek meghatározásához [119]. Bodzás az ívelt profilú kúpos csigahajtás elempárjait megmunkáló szerszámok és kapcsolódásuk elemzését végezte el [120]. Faluvégi kúpkerékek geometriai leírását és koordinátamérőgépen való ellenőrzését vizsgálta [121]. Kelemen a kinematikai módszer segítségével a fogasgyűrűs tengelykapcsolót vizsgálta, lefejtőmarással történő gyártást feltételezve állította elő a fogfelület matematikai modelljét [122].

Az elvégzett szakirodalmi áttekintésből látszik, hogy a mozgástan alapú matematikai leírással lehetséges változatos konstrukciós és technológiai feladat megoldása. A kutatók kifejlesztették és különböző területeken alkalmazták a kapcsolódáselmélet, a mozgásgeometria, a szerszámgeometria és a gyártásgeometria módszereit.

2 AZ ÉRTEKEZÉS CÉLKITŰZÉSEI ÉS A MEGVALÓSÍTÁS MÓDSZEREI

A szakirodalom elemzése alapján körülhatárolom az értekezésem tárgyát és kijelölöm a kutatómunkám célját. Megadom a vizsgálandó paramétereket, a vizsgálatok lefolytatásának menetét, az elméleti elemzések matematikai módszerét és a forgácsolási kísérleti feltételeket.

2.1 Az értekezés célkitűzései

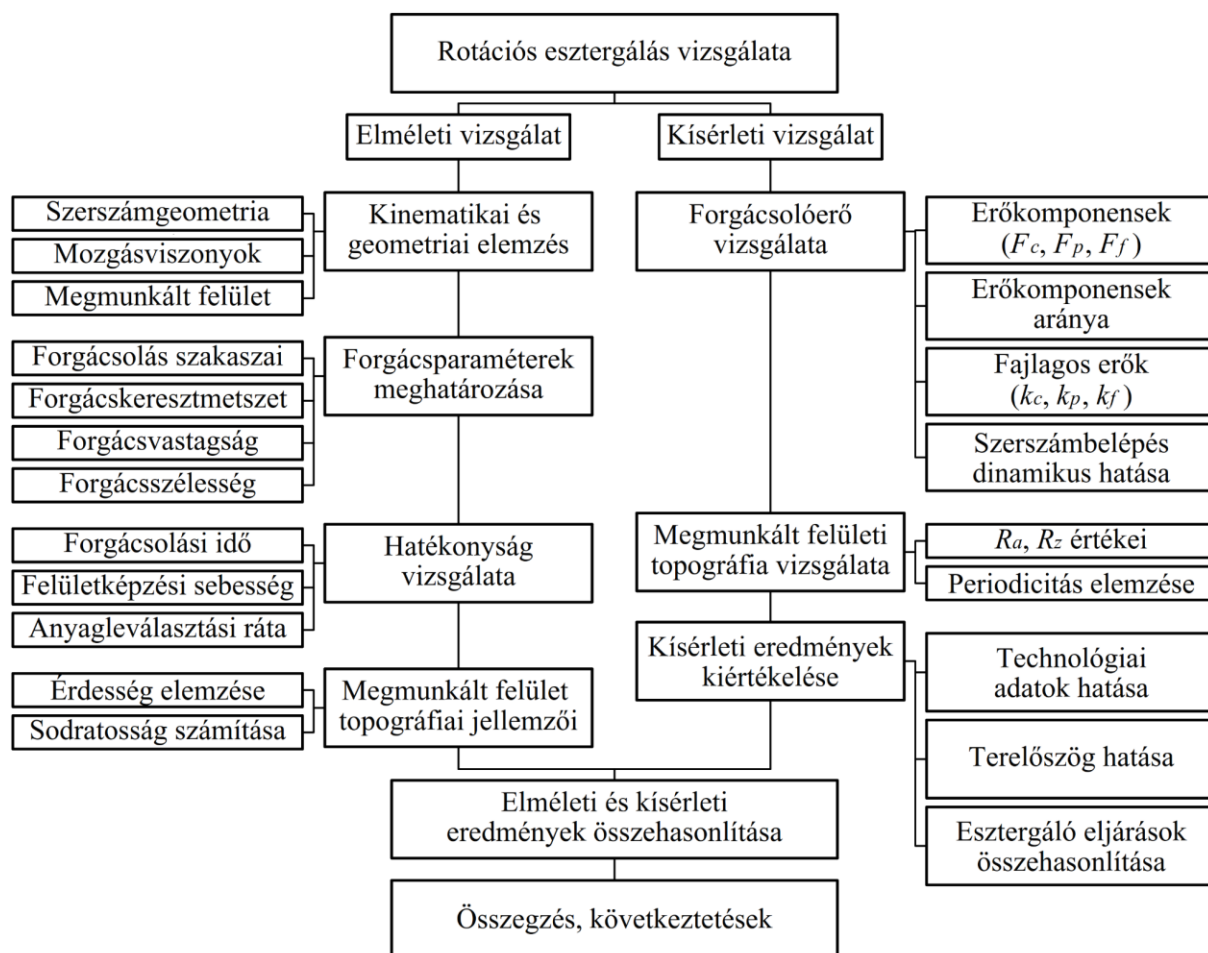
A befejező megmunkálásoknál tapasztalható szigorodó elvárások teljesítése a hagyományostól eltérő geometriai vagy kinematikai viszonyokkal rendelkező eljárásváltozatok fejlesztésével a forgácsoló eljárások egyik kutatási főiránya. Ide tartozik a körelőtolással dolgozó rotációs esztergálás is, amely a nem szokványos kinematika mellett speciális geometriájú szerszámmal rendelkezik. Rotációs mozgásvizonyoknak megfelelő eljárások már korábban is jelen voltak a gépipari megmunkálásokban, elsősorban termelékenységnövelő tulajdonságukat használva. Az előállított alkatrészek pontosságára és felületminőségére vonatkozó követelmények folyamatos szigorodása szükségessé, a szerszámgyártás fejlődése lehetővé tette, hogy a precíziós megmunkálásokban is teret nyerjenek a termelékenységet is biztosító eljárások

A kutatómunkám célja a rotációs esztergálással végzett precíziós befejező megmunkálás és az azzal létrehozott alkatrészfelületek elméleti és kísérleti vizsgálata, az eljárás hatékonyságának és pontosságának növelése a forgácsleválasztás nem, vagy kevésbé feltárt területeinek elemzésével és pontosabb megoldásával.

A kutatást az alábbi lépésekben valósítom meg:

- A megmunkált felület pontos analitikai egyenletének meghatározása a konstruktív szerszámgeometria módszerével.
- A forgácskeresztmetszetet jellemző mérőszámok elméleti értékeinek meghatározásához szükséges összefüggések megadása és a befolyásoló tényezők elméleti értékekre gyakorolt hatásának vizsgálata.
- Az anyagleválasztási ráta meghatározásához szükséges összefüggések megadása, és a forgácsolási adatok, valamint az élgeometria hatásának vizsgálata.
- A főforgácsoló-, az előtolás irányú- és a passzív erők kísérleti vizsgálata a forgácsolási adatok és a szerszámgeometria függvényében.
- A megmunkált felület érdességi és sodratossági jellemzőinek elméleti elemzése és az egyes kinematikai és geometriai paraméterek hatásának analízise.
- A felületi érdesség kísérleti vizsgálata a forgácsolási adatok függvényében.
- Az érdesség elméleti és a kísérleti értékei közötti korreláció meghatározása.

A rotációs esztergálás vizsgálatának lépéseit és a vizsgált adatokat a 2.1. ábra tartalmazza. Várható eredmény a rotációs esztergálás forgácsleválasztásának pontosabb megadása, valamint az eddig tudományos igényességgel nem meghatározott, a technológiai folyamatot befolyásoló paraméterek definiálása és meghatározása.



2.1. ábra. A vizsgálatok menete

2.2 Az elméleti vizsgálatok módszere

Az elméleti vizsgálatok során meghatározom és elemzem a rotációs esztergálás célkitűzésekben megadott jellemzőit. A levezetéseket és az összefüggéseket a Maple 16.0 matematikai szoftver segítségével ellenőriztem. Értekezésemben (az affin tér többparaméteres leképezését alkalmazó) konstruktív szerszámgeometria módszerét alkalmaztam [89] a rotációs esztergálás matematikai leírásához és a megmunkált felület analitikai megadásához. A feladatot a módszer szerint az alábbi lépéseken keresztül oldottam meg:

- szükséges számú és helyzetű koordinárendszer felvétele,
- koordinárendszerek közötti transzformációk értelmezése,
- szerszámél vektoregyenletének megadása,
- a munkadarabon generált, geometriai- és a mozgásviszonyokból következő felület matematikai meghatározása.

A leválasztandó forgács geometriai jellemzőinek vizsgálatához meghatároztam a forgácsleválasztás szakaszait. A forgácsolt felület egyenletéből ívhosszszámítás segítségével meghatároztam a forgács szélesség összefüggését, majd a forgács keresztmetszetet felhasználva kifejeztem az ekvivalens forgácsvastagság egyenletét. A forgácsleválasztás hatékonyságát a gépi főidő, az anyagleválasztási- és a felületképzési ráta meghatározásával vizsgáltam. Ehhez a matematikai modellre felírt peremfeltételekkel meghatároztam a forgácsleválasztás három szakaszára a szerszám szögelfordulását, a tengelyirányú munkautat és a gépi főidőt. A rotációs esztergálással megmunkált felület topográfiájának megadását az érdesség és a sodratosság elméleti értékeinek meghatározásával végeztem el. A forgácsolt felület alapsíkbeli egyenletével az érdességi mérőszámok közül az egyenetlenség-magasság és az átlagos érdesség; a sodratosságot leíró paraméterek közül a periódushossz, az emelkedési szög és a mélység értékeit határoztam meg.

2.1. táblázat. Az elméleti vizsgálatok tartománya

	λ_s [°]	r_s [mm]	d_m [mm]	L_m [mm]	n_s [1/min]	n_m [1/min]	a_p [mm]	$v_{s,a}$ [mm/s]
Min	15	20	20	10	1	800	0,4	0
Bázis	30	40	40	20	2	1600	0,8	0
Max	45	60	60	30	3	2400	1,2	8

Az analitikai úton kapott összefüggések segítségével megvizsgáltam a geometriai és kinematikai paraméterek hatását a rotációs esztergálás vizsgált jellemzőire. A vizsgálatához az egyes paraméterekre 1-1 bázisérték került felvételre az ipari gyakorlatot és a célkitűzéseket figyelembe véve, amelyek környezetében végeztem el az elemzést. Az egyes paraméterek értékeit $\pm 50\%$ -os tartományban változtattam, miközben a vizsgált jellemzőn kívül a többi változatlan maradt. Kivételt a kiegészítő előtolás jelent, melynél a bázisértéknek $v_{s,a} = 0$ mm/s érték került kiválasztásra, mely a tisztán körelőtolás esetét jelenti. A paraméterek bázisértékeit, illetve a változtatás tartományának határértékeit a 2.1. táblázat tartalmazza.

2.3 A forgácsolási kísérletek körülményei

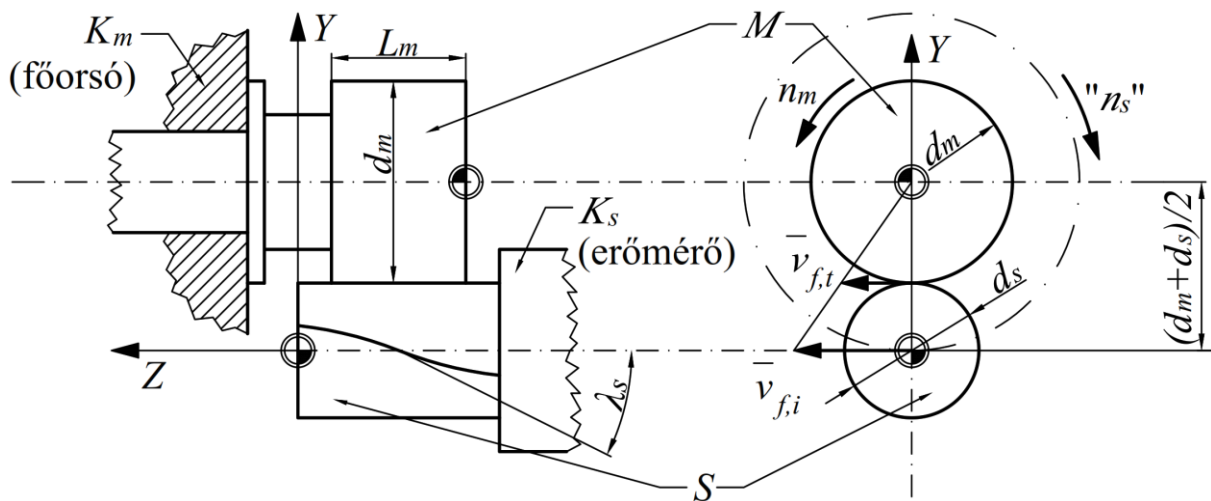
A forgácsoló erő és a felületi érdesség meghatározására és elemzésére kísérleteket végeztem rotációs esztergálással. A kísérleti feltételek (gép, munkadarab, szerszám, beállítási adatok, mérő berendezések és módszerek, stb.) úgy kerültek meghatározásra, hogy lehetővé tegyék a forgácsoló erő komponenseinek és a felületek érdességének vizsgálatát a nagy előtolással végzett megmunkálásnál különböző terelőszögek esetén. A vizsgálatokat a Miskolci Egyetem Gyártástudományi Intézet gép- és eszközparkjával hajtottam végre.

2.3.1 Kísérleti feltételek

Az eljárást jellemző mozgásviszonyok a kísérletek során egy Perfect-Jet MCV-M8 típusú megmunkáló központon valósultak meg. Ez a gép rendelkezik a kísérletekhez szükséges teljesítménnyel és merevséggel, továbbá a Gyártástudományi Intézet erőmérő egységét is rögzíteni lehet rá. A megmunkálásoknál Rhenus TS 25 hűtő-kenő folyadék 5%-os emulzióját alkalmaztam.

A kísérleteket 12 mm hosszú és 40 mm átmérőjű hengeres felülettel rendelkező munkadarabokon végeztem el. Nemesített, 220 HV keménységű C45 acél anyagminőség került kiválasztásra a kutatási célkitűzéseket és az ipari gyakorlatban való elterjedt alkalmazást figyelembe véve. A megmunkálandó hossz a választott kísérleti szerszámok geometriai adatai alapján lett megválasztva.

A kísérlet kinematikai elrendezését mutatja a 2.2. ábra. A marógép főorsójába (K_m) fogott kísérleti próbadarab (M) forgó mozgása (n_m) a forgácsoló főmozgást biztosítja. A forgácsoló szerszám (S) a gépasztalon kialakított készülékben (K_s) került rögzítésre ER32 önközpontosító patronos befogóba. A szerszám gépasztallal együtt végzett körinterpolációs mozgása ($v_{f,i}$) a főorsó körül biztosította a megmunkáláshoz szükséges körelőtolást (n_s). A szerszámcserék után a nullpont újrafelvételre került a szár részen a befogási hiba elkerülésére.



2.2. ábra. A szerszám és a munkadarab egymáshoz viszonyított helyzete és mozgásai

A rotációs esztergáláshoz ötféle emelkedési szöggel (terelőszöggel) rendelkező forgácsoló szerszámot választottam. Az eszterga szerszámok a többélű szerszámokból úgy kerültek kialakításra, hogy a nem aktív éleket lekészörültük. Az alkalmazott szerszámokat a terelőszögük szerint jelöltem el: $R13$ [123], $R15$ [124], $R30$ [125], $R45$ [126] és $R50$ [127]. A mért értékek összehasonlításához hosszesztergálást is végeztem lapkás szerszámmal [128]. A kísérletek során használt szerszámok fő jellemzői a 2.2. táblázatban láthatóak. A befogott 15° , 30° és 45° terelőszöggel rendelkező szerszámok láthatók a 2.3. ábrán.



R15



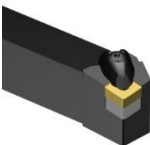
R30



R45

2.3. ábra. Forgácsoló szerszámok befogási módja

2.2. táblázat. A kísérletek során használt szerszámok fő jellemzői

Jel	R13	R15	R30	R45	R50	CNMG
Szerszám kialakítás						
Gyártó	Sandvik Coromant	Sandvik Coromant	Fraisa	Sandvik Coromant	Sandvik Coromant	Sandvik Coromant
ISO kód	R390-016A16L-11L R390-11T304E-PL	R390-032EH25-17L R390-170408E-PL	P5300682	1P341-1600-XB	R215.38-20050- AC38L	CNMG 120412-PM DCLNL 2525 M 12
Anyagminőség	1030	1030	HM MG10	1630	1620	4325
Átmérő (d_s) [mm]	16	32	20	16	20	-
Spirálszög (λ_s) [°]	13,45	15	30	45	50	-

A technológiai adatokat úgy választottuk meg, hogy a rotációs esztergálásnál a nagy előtolások hatását lehessen vizsgálni a szerszámgeometriai korlátok figyelembevételével. A választott szerszámoknál az előtolás vizsgált tartományai a következők voltak: az R13 szerszámnál 0,2 – 2,8 mm/ford., az R15 szerszámnál 0,1 – 2,8 mm/ford., az R30 szerszámnál 0,1 – 1,6 mm/ford., az R45 szerszámnál 0,1 – 1,0 mm/ford., az R50 szerszámnál 0,1 – 0,8 mm/ford., a CNMG szerszámmal 0,1 – 1,0 mm/ford. tartományban végeztem el a kísérleteket. A rotációs esztergálásnál tisztán körelőtolással került beállításra. Minden előtoláson háromféle fogásmélység (0,1 mm, 0,2 mm és 0,3 mm) került beállításra. A forgácsoló sebesség esetén 3 értéken végeztem el a kísérleteket: a váltólapkás szerszámok esetén 200 m/min, 250 m/min és 300 m/min, míg a monolit szerszámoknál 150 m/min, 200 m/min és 250 m/min értékeknél.

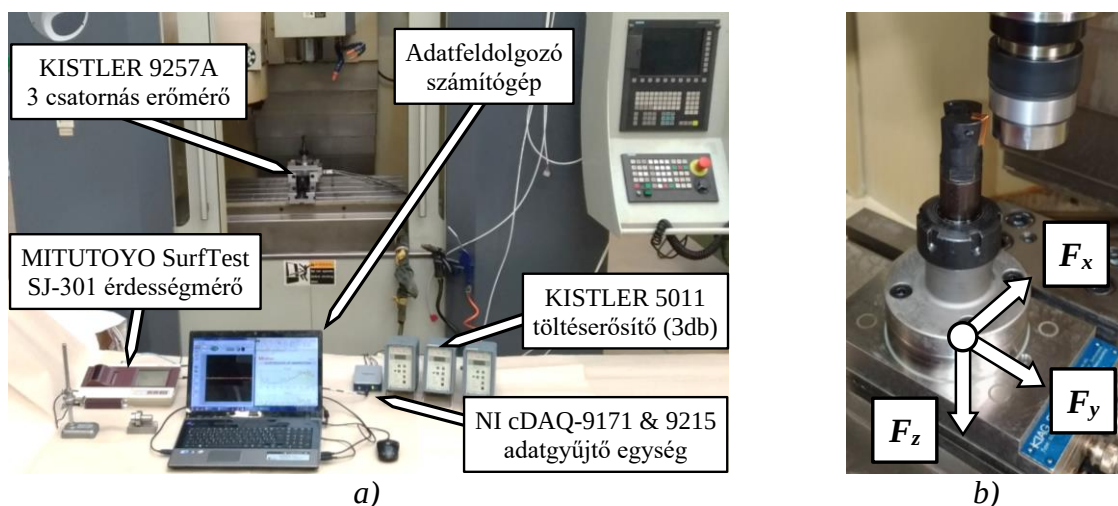
A kísérletek során beállított technológiai adatkombinációkat az M.1. melléklet tartalmazza részletesen. A forgácsolási adatok vizsgált tartományai: $f_a = 0,1 - 2,8$ mm/ford., $a_p = 0,1 - 0,3$ mm, $v_c = 150 - 300$ m/min; $\lambda_s = 13,45 - 50^\circ$.

2.3.2 Forgácsoló erő mérése

A kísérleteknél alkalmazott mérőrendszer a 2.4. a) ábrán látható. A kísérletek közben a forgácsoló erőt egy, a szerszám és a gépasztal közé beépített, Kistler 9257A háromtengelyes erőmérő egységgel mértem. A berendezés három, egymásra merőleges irányban rögzítette az adott időpillanatban ébredő erőket (F_x , F_y , F_z) a 2.4. b) ábrán látható beállítás szerint.

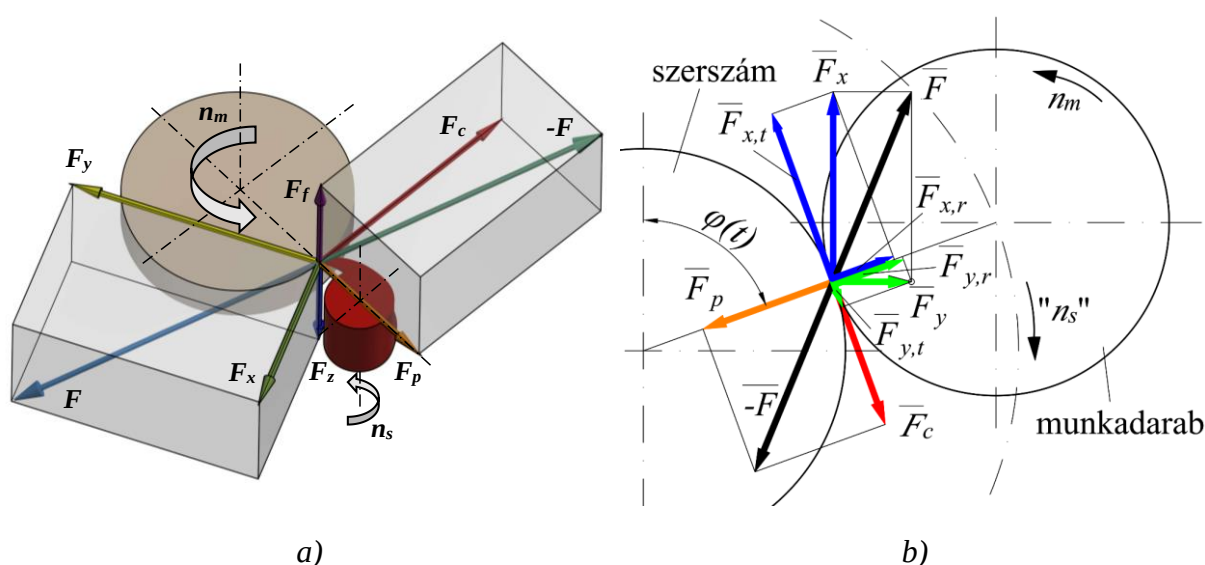
A piezoelektromos elven működő erőmérő 3 kimenettel rendelkezik, melyeken az adott irányú erő nagyságával egyenesen arányos mértékű töltés keletkezik. A három jelet 1-1 Kistler 5011 töltéserősítő alakítja át feszültségértékké, melyeket a National Instruments által

gyártott cDAQ-9171 házú NI-9215 adatgyűjtő egység mér és közvetít az adatgyűjtő számítógép felé. Az 1000 Hz mintavételezési frekvencián mért adatokat egy a NI Labview szoftverben készített program jeleníti meg és tárolja el a későbbi feldolgozáshoz. Az erőmérő rendszert a Gyártástudományi Intézet mechanikus erőmérő egységével kalibráltam be.



2.4. ábra. Az erő és érdességmérő rendszer felépítése (a), az erőmérő tengelyei (b)

A kiértékelés során a kísérleti eredményeket a következők szerint dolgoztam fel. Az erőmérő rendszer az elvégzett kísérletek során rögzítette az adott időpillanatban ébredő X , Y és Z irányú erőkomponenseket. A körelőtolás miatt ugyanakkor az X és az Y irányú erők még az állandó keresztmetszetű forgács folyamatos leválasztásának szakaszában is minden időpillanatban változnak. Ezért a vizsgálatok során a szerszámok és beállítások összehasonlításánál célszerűbb a szerszámhoz kötött koordináta-rendszerben a tangenciális (főforgácsoló, F_c), radiális (passzív v. tengelysíkban ható, F_p) és axiális (előtolás irányú, F_f) erőket vizsgálni. A két erőrendszer kapcsolatát a 2.5. ábra alapján írom le.



2.5. ábra. A géphez kötött (F_x , F_y , F_z) és a szerszámhoz kötött (F_c , F_p , F_f) koordináta-rendszerek kapcsolata

A szerszámhoz kötött és a gépasztalhoz kötött koordináta-rendszerek közötti különbség a 2.5.a) ábrán látható. A pillanatnyi mért F_x , F_y és F_z erők és a munkadarab-szerszám relatív helyzetének ismeretében kiszámíthatók az adott időpillanatban a megfelelő F_c , F_p és F_f erők. A forgácsoló erő komponenseinek átszámításánál párhuzam vonható a homlokmarás kiértékelésével. Ezen eljárás vizsgálatakor a gépasztalon rögzített munkadarabra a megmunkált felület síkjában ható (X , Y) és a szerszámtengellyel párhuzamos (Z) irányú erők helyett gyakran a marószerszámmal együtt forgó, forgácsoló élre ható F_c , F_p és F_f erőket vizsgálják [129]. Fontos különbség azonban, hogy homlokmarásnál a forgácsoló erő támadáspontjának helye csak az asztal síkjában változik (a szerszámmal együtt forogva). Rotációs esztergálásnál azonban a kontaktpont a főorsóval párhuzamos (Z) irányban is elmozdul a csavarvonalú él munkadarabbal érintkező aktív szakaszával együtt.

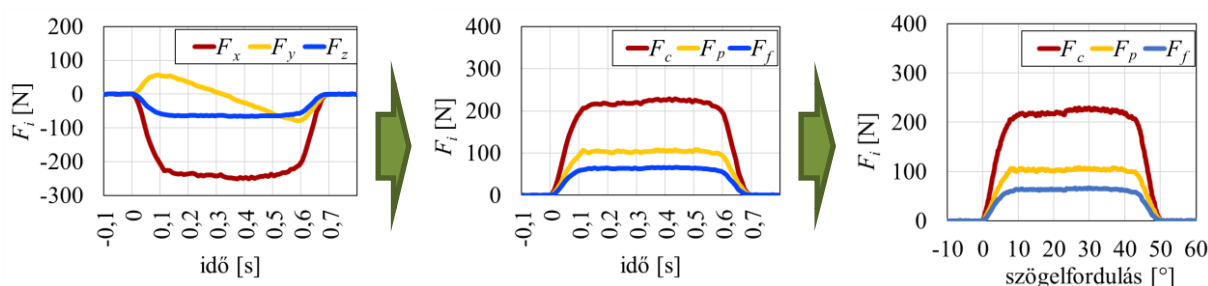
A számításhoz használt összefüggéseket a 2.5.b) ábra alapján ismertetem. A szerszámok a befogó egységbe úgy kerültek rögzítésre, hogy a fogásba lépés a $+F_x$, a fogásból kilépés pedig a $-F_x$ tartományba essen a 2.4. ábrán is látható módon. A $\varphi(t)$ (2.5.b) ábra) a kiindulási ponttól mért szögelfordulását jelenti a munkadarab és a szerszám burkolóhengerének metszéspontjának. A számításokhoz az X és az Y irányú erőket felbontottam a szerszámél burkolóhengerét érintő (tangenciális) és az erre merőleges (radiális) komponensekre. A főforgácsoló erőt (F_c) megkapjuk, ha F_y tangenciális komponenséből kivonjuk az F_x tangenciális komponensét a 2.1. egyenlet szerint. A passzív erő (F_p) meghatározásához az erőmérő által mért F_x és F_y erők összegének -1-szeresét kell venni a 2.2. egyenletben látható módon. Az előtolás irányú erő nagysága megegyezik a Z tengely irányába ható erővel, irányba viszont ellentétes (2.3. egyenlet).

$$F_c = -1(F_{x,t} - F_{y,t}) = F_y \cos(\varphi(t)) - F_x \sin(\varphi(t)) \quad (2.1)$$

$$F_p = -1(F_{x,r} + F_{y,r}) = -F_x \cos(\varphi(t)) - F_y \sin(\varphi(t)) \quad (2.2)$$

$$F_f = -F_z \quad (2.3)$$

A 2.1. – 2.3. egyenleteket úgy határoztam meg, hogy az erők pozitív értelme a szerszám élére ható adott irányú terhelést eredményezze (2.5. ábra). Az elvégzett kísérletek kimeneti eredményeül kapott F_x , F_y és F_z erők esetén minden időpillanatban kiszámításra kerültek az F_c , F_p és F_f erők. A számításokhoz a $\varphi(t)$ azon szögértékének meghatározására, amikor a szerszám éppen fogásba lép a munkadarabra, a szerszámgép útmérő rendszerének segítségével méréseket végeztem. A számításokat követően a szerszámra ható erők változását az idő és a szerszám szögelfordulása szerinti is ábrázoltam a 2.6. ábrán látható módon.



2.6. ábra. A mért F_x , F_y , és F_z erőkből számított F_c , F_p és F_f erők
($\lambda_s = 30^\circ$, $a = 0,1$ mm, $f_a = 0,8$ mm/ford., $v_c = 200$ m/min)

A számítások eredményeként kapott $F_c(t)$, $F_p(t)$ és $F_f(t)$ görbéknek meghatároztam és elemeztem a maximális értékét, mellyel az állandó keresztmetszetű forgács folyamatos leválasztásának szakaszát jellemzem.

A fajlagos forgácsoló erő értékei a 2.4. egyenlet szerint kiszámításra és összehasonlításra kerültek az F_c , F_p és F_f erőkre. Az egyes beállításoknál meghatároztam és vizsgáltam a szerszámot érő dinamikus terhelést a Bekezdési szakasz során, vagyis az egységnyi idő alatti erőnövekedést ($\Delta F_i/\Delta t$). Ehhez meghatároztam a Bekezdési időket.

Az erővizsgálat kísérleti és elméleti eredményei az M.2. mellékletben találhatóak.

$$F_i = k_i A_c \rightarrow k_i = \frac{F_i}{A_c} \quad (i = c, p, f) \quad (2.4)$$

2.3.3 Megmunkált felület érdességének vizsgálata

Az értekezésem egyik célkitűzése a rotációs esztergálással megmunkált felületek érdességének vizsgálata. Ezen terület kutatási irányait Benardos és Vosniakos [130] négy fő kategóriába sorolták: a megmunkálások analitikus modellezése forgácsolásméleti alapokon, kísérletek végzése különböző befolyásoló tényezők hatásának vizsgálatára, kísérlettervezési módszerek alkalmazása, a vizsgálatok Mesterséges Intelligencián alapuló megközelítése. Hasonló csoportosítás szerint végezte elemző munkáját Mgherony és kutatótársai [131] is, ahol az előző csoportosítás kísérleteken alapuló módszereit nem különítették el. Látható, hogy az analitikai alapú vizsgálatok mellett a felületi érdesség jellemzéséhez szükséges kísérleti vizsgálat is. Ezért a megmunkált felületeken a forgácsolást követően egy Mitutoyo SurfTest SJ-301 kétdimenziós érdességmérő eszközzel és egy AltiSurf® 520 érdességmérő gépen elemeztem a felületi topográfiát.

Minden felületen három, egymáshoz képest 120°-ban elhelyezkedő alkotó mentén történt a vonalmenti érdességmérés. A topográfia elemzéséhez szerszámonként egy beállítás esetén felületi érdességmérés történt 4 mm x 4 mm területen.

Az érdességmérő műszereken a szabvány [132] szerint 0,1 mm/ford. előtolás esetén 0,25 mm határhullámhossz, 0,2 – 0,4 mm/ford. előtolás esetén 0,8 mm határhullámhossz, 0,6 – 1,2 mm/ford. előtolás között 2,5 mm határhullámhossz, 1,6 – 2,8 mm/ford. előtolás esetén 4 mm határhullámhossz került beállításra.

A mért érdességi paraméterek közül az átlagos érdesség és az átlagos egyenetlenség magasság értékeit vizsgáltam. Az elemzéshez meghatároztam a beállításoknál történt három mérés R_a és R_z eredményeinek számtani átlagát, valamint az elméleti összefüggések segítségével az R_a és R_z mérőszámok elméleti értékei is kiszámításra kerültek. Az M.3. melléklet tartalmazza az érdességmérés mért és számított eredményeit. A kiértékelés során az előtolás és a szerszámgeometria függvényében vizsgáltam az értékeket.

3 A ROTÁCIÓS ESZTERGÁLÁST LEÍRÓ MATEMATIKAI-ANALITIKAI MODELL

Értekezésemet a rotációs esztergálást leíró matematikai modell kidolgozásával folytatom. Ennek segítségével lehetséges a forgácskeresztmetszet, a hatékonyságot jellemző paraméterek és a felületminőség elméleti mérőszámainak meghatározása. Először meghatározom a kinematikai modellt, majd meghatározom a forgácsolt felület kétparaméteres egyenletét és alapsíkbeli metszetének egyváltozós függvényét.

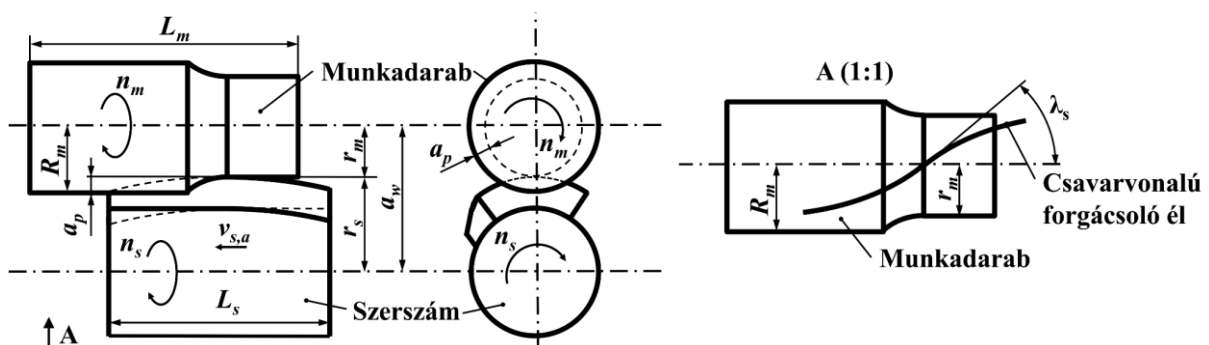
3.1 Az eljárás kinematikai modellje

A matematikai leíráshoz választott módszer lényege, hogy az él vektor-egyenletének transzformációjával előállítható a forgácsolt felület egyenlete. Ebben az alfejezetben a köréltolású esztergálás kinematikai modelljét határozom meg a koordináta-rendszerek és a köztük kapcsolatot teremtő egyenletek leírásával. Ehhez elemzem a mozgásviszonyokat, majd meghatározom a koordináta-rendszereket és a közöttük fennálló transzformációs egyenleteket.

3.1.1 Geometriai és kinematikai vizsgálat

A rotációs esztergálás kinematikai viszonyait a 3.1. ábra alapján írom le. A munkadarab tengelyével párhuzamos tengelyű csavarvonalú forgácsoló él forgatásával köréltolást kapunk. Az él lassú, forgó mozgása közben folyamatosan lép az anyagba, majd a szerszám és a munkadarab tengelyei által kifeszített sík elérésével állandósul a forgácskeresztmetszet, kialakul az esztergálásra jellemző folyamatos anyagleválasztás.

A rotációs esztergálás jellemző paramétereit két fő csoportba soroljuk: geometriai és kinematikai paraméterek. A geometriai paraméterek a munkadarab megmunkálendő (kiindulási) felületének sugara (R_m), a munkadarab megmunkált (elkészült) felületének sugara (r_m), a szerszám sugara (r_s), a szerszámél terelőszöge (λ_s) (amely a csavarvonalú él mentemelkedését jellemzi), a megmunkálendő felület hossza (L_m) és a szerszám élének axiális irányban mért vetülete (L_s). A tengelytávolság (a_w) révén állítható be a fogásmélység (a_p).



3.1. ábra. A rotációs esztergálás kinematikai vázlata

A megmunkálás elvégzéséhez beállítandó kinematikát meghatározó paraméterek a forgácsolósebességet (v_c) befolyásoló munkadarabfordulatszám (n_m) és a körmozgásból származó axiális előtolást ($f_{r,a}$) megadó szerszámfordulatszám (n_s). Szükség lehet a szerszám forgó mozgása mellett kiegészítő, axiális irányú előtoló sebességre ($v_{s,a}$) is abban az esetben, ha a munkadarab megmunkálendő felületének hossza meghaladja a szerszám élének szimmetriatengelyre mért vetületét. A matematikai levezetések során feltételezem, hogy n_m , n_s , a_p , r_m , r_s és λ_s nagyobb nullánál és $v_{s,a}$ nem negatív.

Az él munkadarab alkotóján mért eredő axiális előtolása (f_a) két mellékmozgás összegzéséből ered: a körelőtolásból ($f_{r,a}$) és a kiegészítő axiális irányú előtolásból ($f_{v,a}$). Az első komponens esetében figyelembe kell venni a csavarvonal emelkedési szögét. A körelőtolásból származó tangenciális előtolósebesség a szerszám burkolóhengerét érintő vektor. Ennek a vektornak és a fent említett szögnek az ismeretében kiszámítható a forgó mozgásból adódó axiális előtolás ($f_{r,a}$). A második komponens számítása ($f_{v,a}$) a kiegészítő előtoló sebesség ($v_{s,a}$) ismeretében kifejezhető ($v_{s,a} = f_{v,a} \cdot n_m$). Összegezve az előtolás (f_a) a 3.1. egyenlet szerint számítható.

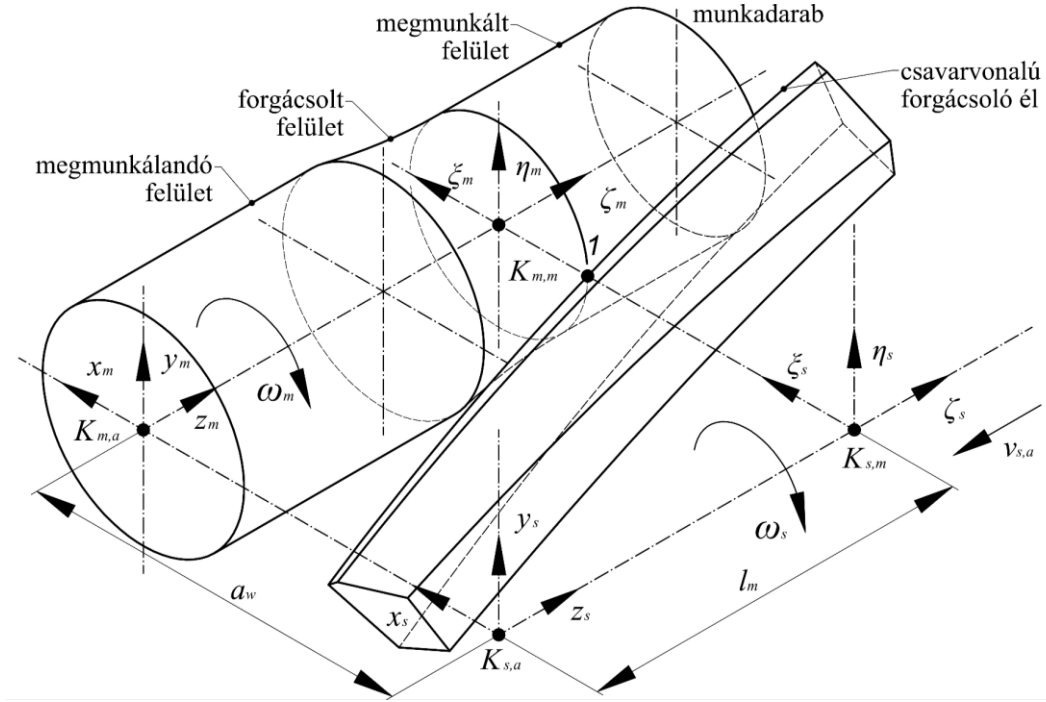
$$f_a = f_{r,a} + f_{v,a} = \frac{v_{f,t}}{n_m \operatorname{tg} \lambda_s} + \frac{v_{s,a}}{n_m} = 2\pi \frac{\omega_s}{\omega_m} \left[\frac{r_s}{\operatorname{tg} \lambda_s} + \frac{v_{s,a}}{\omega_s} \right] \quad (3.1)$$

Az elemzés eredményeként megadtam az eljárás matematikai leírásához szükségesek geometriai és kinematikai paramétereit, melyek a következők: a megmunkált felület sugara (r_m), a szerszámsugár (r_s), az él terelőszöge (λ_s), a megmunkálendő felület hossza (L_m), a tengelytávolság (a_w), a munkadarab fordulatszáma (n_m), a szerszám fordulatszáma (n_s) valamint a kiegészítő előtoló sebesség ($v_{s,a}$).

3.1.2 Alkalmazott koordináta-rendszerek

Az alkalmazott kinematikai leírás alapja, hogy a megfelelő koordináta-rendszerek felvételével, az egyes koordináta-rendszerek közötti transzformációs mátrix segítségével, a szerszám egyenletének és a munkadarab és szerszám közötti mozgáviszonyok megadásával felírható a megmunkált felület egyenlete. A koordináta-rendszerek felvételekor a kezdőpont helyes választása mellett figyelmet igényel a koordináta-tengelyek megfelelő irányítottsága. A 3.2. ábrán látható modell meghatározásánál az alábbi szempontokat vettem figyelembe:

- a szerszámhoz és a munkadarabhoz is két-két koordináta-rendszert kötöttem: 1-1 térben kötött „álló koordináta-rendszert” ($K_{s,a}$ és $K_{m,a}$) és 1-1 a felületképző ponttal (1) együtt haladó „mozgó koordináta-rendszert” ($K_{s,m}$ és $K_{m,m}$)
- „ ξ_i , η_i , ζ_i ” betűkkel a mozgó, „ x_i , y_i , z_i ” betűkkel az álló koordináta-rendszerek tengelyei lettek eljelölve (ahol $i = s$ – „szerszám”, m – „munkadarab”)
- a szerszám rögzített és mozgó koordináta-rendszerének z_s és ζ_s tengelyei a rotációs esztergaszerszám csavarvonalú élének szimmetriatengelyével esnek egyvonalba
- a munkadarab álló és mozgó koordináta-rendszerének z_m és ζ_m tengelyei a munkadarab szimmetriatengelyével essenek egy vonalba
- a szerszámalapsík az $[x_i; z_i]$ sík, illetve a $[\xi_i; \zeta_i]$ ($i = s, m$) koordináta tengelyek által kifeszített sík legyen
- a koordináta-rendszerek jobbsodrásúak legyenek
- a szerszám és a munkadarab mozgó koordináta-rendszereinek ξ_i ($i = s, m$) tengelyei a szerszám „1” ponttal jelölt felületképző pontján menjen át



3.2. ábra. A rotációs esztergálás matematikai-analitikai modellje

A λ_s emelkedési szögű csavarvonalú szerszámé egyenlete a szerszám mozgó koordináta-rendszerében ($K_{s,m}$) kerül megadásra. A szerszám álló koordináta-rendszerében ($K_{s,a}$) a forgácsoló szerszám mozgása írható le. Ez a $K_{s,m}$ koordináta-rendszer megfelelő transzformálását jelenti a $K_{s,a}$ koordináta-rendszerbe. A szerszám és a munkadarab álló koordináta-rendszerei között a szimmetria tengelyek távolsága (tengelytáv) teremt kapcsolatot. A munkadarab forgó mozgása a $K_{m,a}$ álló és a $K_{m,m}$ mozgó koordináta-rendszerek közötti transzformáció segítségével adható meg. Így a $K_{m,m}$ koordináta-rendszerben megkapom a megmunkált felület egyenletét a szerszámél $K_{s,m}$ koordináta-rendszerben felírt egyenletének és a mozgásviszonyoknak az ismereteiben.

3.1.3 Transzformációs egyenletek

A koordináta-rendszerek felvételét követően a közöttük lévő kapcsolatokat leíró transzformációs egyenletek meghatározása következik. Általános tulajdonságuk ezen egyenleteknek, hogy tartalmaznak egy forgatómátrixot és egy lineáris eltolás vektort [90]. Az egyes transzformációs egyenletek közös tulajdonsága, hogy az n -edik koordináta-rendszerben leírt vektor-egyenlet beírásával előállítható az egyenlet alakja az $(n+1)$ -edik koordináta-rendszerben. A négy koordináta-rendszer miatt 3 transzformációs egyenletre van szükségünk, melyeket a következőkben részletezek.

A szerszám mozgó ($K_{s,m}$) és rögzített ($K_{s,a}$) koordináta-rendszere közötti kapcsolatot a 3.2. egyenlet írja le ($t \in \mathbb{R}$). Ezzel a koordinátatranszformációval adom meg a szerszám mozgó és álló koordinátarendszerei között a szerszám forgómozgását egy forgatómátrix ($\mathbf{R}_{sa,sm}$) és kiegészítő axiális előtolását egy lineáris eltolás vektor ($\mathbf{t}_{sa,sm}$) segítségével.

$$\mathbf{r}_{sa}(t) = \mathbf{R}_{sa,sm}(t)\mathbf{r}_{sm} + \mathbf{t}_{sa,sm}(t) = \begin{bmatrix} \cos \omega_s t & -\sin \omega_s t & 0 \\ \sin \omega_s t & \cos \omega_s t & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{r}_{sm} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ l_m - v_{s,a}t \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

A szerszám álló ($K_{s,a}$) és a munkadarab álló ($K_{m,a}$) koordináta-rendszerei közötti transzformáció a szimmetriatengelyek távolságának megadását jelenti egy lineáris eltolásvektor segítségével ($\mathbf{t}_{ma,sa}$) a 3.3. egyenlet szerint.

$$\mathbf{r}_{ma}(t) = \mathbf{R}_{ma,sa} \mathbf{r}_{sa}(t) + \mathbf{t}_{ma,sa} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{r}_{sa}(t) + \begin{bmatrix} -a_w \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

A munkadarab rögzített ($K_{m,a}$) és mozgó ($K_{m,m}$) koordináta-rendszere közötti transzformáció egyrészt a munkadarab forgómozgását jelenti az $\mathbf{R}_{mm,ma}$ forgatómátrix-szal, másrészt az álló és a mozgó koordináta rendszerek $t = 0$ időpillanatbeli távolságával megegyező lineáris eltolást okozza a $\mathbf{t}_{mm,ma}$ vektorral a 3.4. egyenletben.

$$\mathbf{r}_{mm}(t) = \mathbf{R}_{mm,ma}(t) \mathbf{r}_{ma}(t) + \mathbf{t}_{mm,ma} = \begin{bmatrix} \cos \omega_m t & \sin \omega_m t & 0 \\ -\sin \omega_m t & \cos \omega_m t & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{r}_{ma} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -l_m \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Az ismert $\mathbf{R}_{sa,sm}$, $\mathbf{R}_{ma,sa}$, $\mathbf{R}_{mm,ma}$ mátrixok és $\mathbf{t}_{sa,sm}$, $\mathbf{t}_{ma,sa}$, $\mathbf{t}_{mm,ma}$ vektorok segítségével a 3.2.-3.4. egyenletek összegzésével az eredő transzformációs egyenletet kapom (3.5. egyenlet).

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{mm}(t) &= \mathbf{R}_{mm,ma}(t) \left[\mathbf{R}_{ma,sa} \left(\mathbf{R}_{sa,sm}(t) \mathbf{r}_{sm} + \mathbf{t}_{sa,sm}(t) \right) + \mathbf{t}_{ma,sa} \right] + \mathbf{t}_{mm,ma} = \\ &= [\mathbf{R}_{mm,ma}(t) \mathbf{R}_{ma,sa} \mathbf{R}_{sa,sm}(t)] \mathbf{r}_{sm} + [\mathbf{R}_{mm,ma}(t) \mathbf{R}_{ma,sa} \mathbf{t}_{sa,sm}(t) + \\ &\quad + \mathbf{R}_{mm,ma}(t) \mathbf{t}_{ma,sa} + \mathbf{t}_{mm,ma}] = \mathbf{R}_{mm,sm}(t) \mathbf{r}_{sm} + \mathbf{t}_{mm,sm} \end{aligned} \quad (3.5)$$

A szerszám mozgó koordináta-rendszerében felírt vektor-egyenlet ($\mathbf{r}_{sm}$) alakja a munkadarab mozgó koordináta-rendszerében ($\mathbf{r}_{mm}$) kifejezhető a fenti egyenlet segítségével. Az 3.5. egyenlet kijelölt műveleteit elvégezve az $\mathbf{R}_{mm,sm}$ eredő forgatómátrixot és a $\mathbf{t}_{mm,sm}$ eredő eltolásvektort eredményezi, melyek közvetlen transzformációs kapcsolatot teremtenek a szerszám mozgó és a munkadarab mozgó koordináta-rendszerek között.

$$\sin \omega_s t \cdot \cos \omega_m t - \cos \omega_s t \cdot \sin \omega_m t = \sin(\omega_s t - \omega_m t) \quad (3.6)$$

$$\cos \omega_s t \cdot \cos \omega_m t + \sin \omega_s t \cdot \sin \omega_m t = \cos(\omega_s t - \omega_m t) \quad (3.7)$$

A 3.6.-3.7. egyenletek szerinti átalakításokkal az eredő transzformációs $\mathbf{r}_{mm}(\mathbf{r}_{sm}(t))$ vektor-vektor egyenlet a 3.8. egyenletként írható föl.

$$\mathbf{r}_{mm}(t) = \begin{bmatrix} \cos(\omega_s t - \omega_m t) & -\sin(\omega_s t - \omega_m t) & 0 \\ \sin(\omega_s t - \omega_m t) & \cos(\omega_s t - \omega_m t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{r}_{sm} + \begin{bmatrix} -a_w \cos \omega_m t \\ a_w \sin \omega_m t \\ -v_{s,a} t \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

3.2 A szerszámél és a forgácsolt felület

A transzformációs egyenletek ismeretében először a forgácsoló él egyenletét kell meghatározni. Ezt követően a forgácsolt felület egyenletét állítom elő.

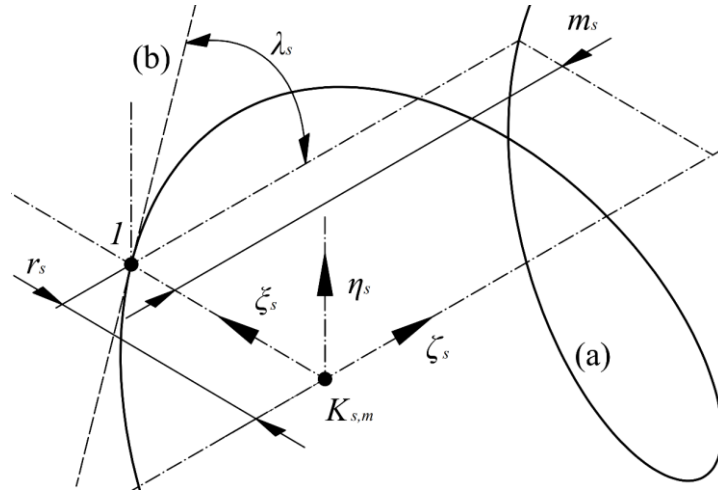
3.2.1 A forgácsoló él

A forgácsoló él egyenletének felírása a 3.3. ábra alapján lehetséges. A vázlat az 1 ponton átmenő ζ_s tengelyű csavarvonalat (a) és az abban a pontban a görbét érintő egyenest (b) mutatja. A 3.9. egyenlet egy r_s sugarú, m_s menetemelkedésű, ζ_s irányú, p paraméterű jobbemelkedésű csavarvonal általános parametrikus egyenletrendszerét mutatja a szerszám mozgó koordináta-rendszerében felírva.

$$\begin{cases} \xi_s = r_s \cos(p) \\ \eta_s = r_s \sin(p) \\ \zeta_s = \frac{1}{2\pi} m_s(p) \end{cases}, \quad p \in \mathbb{R} \quad (3.9)$$

A csavarvonal síkba terítésével és átalakítással kapom a 3.10. egyenlet szerinti azonosságot a menetemelkedés, a szerszám sugara és a terelőszöge között.

$$\operatorname{tg}(\lambda_s) = \frac{2\pi r_s}{m_s} \longrightarrow \frac{m_s}{2\pi} = r_s \operatorname{ctg}(\lambda_s) \quad (3.10)$$



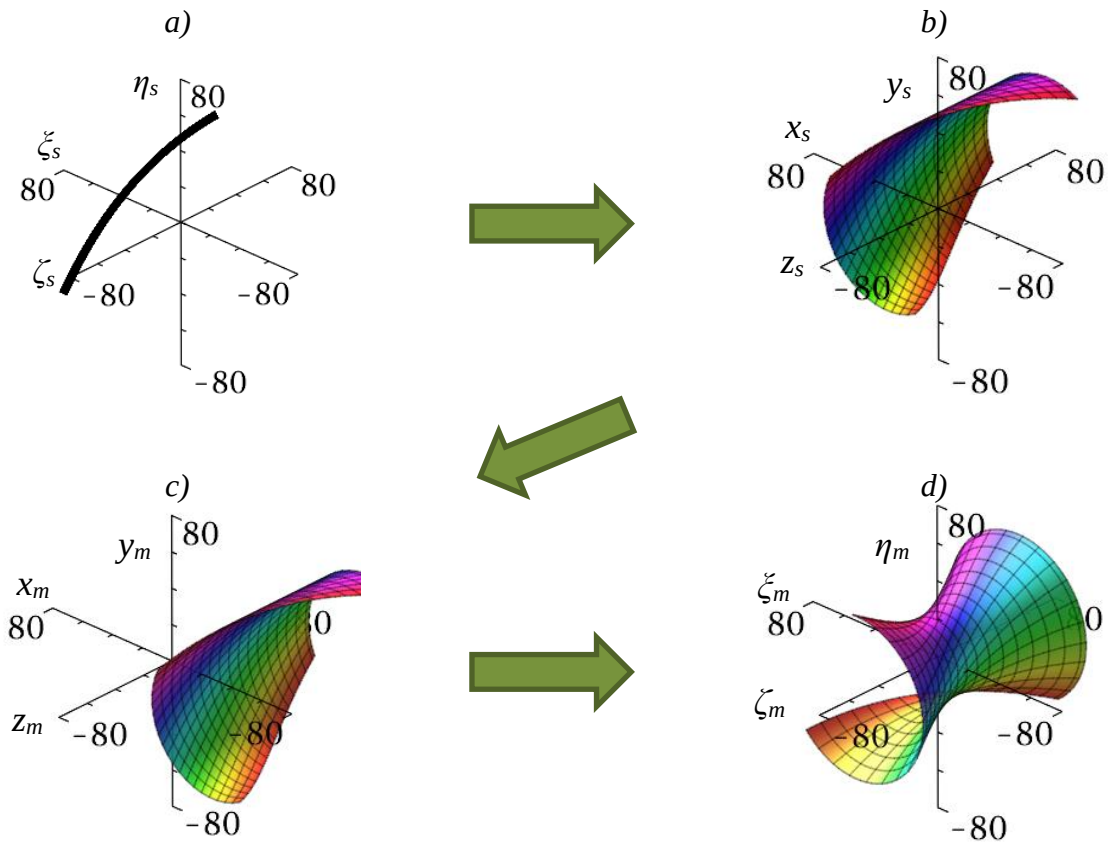
3.3. ábra. A forgácsoló él csavarvonal geometriája

Így a 3.9. és a 3.10. egyenlet rendezésével kapjuk a p paraméter függvényében a csavarvonal vektor egyenletét a $K_{s,m}$ koordináta rendszerben.

$$\mathbf{r}_{sm}(p) = \begin{bmatrix} r_s \cos(p) \\ r_s \sin(p) \\ p r_s \operatorname{ctg}(\lambda_s) \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

3.2.2 A forgácsolt felület kétparaméteres egyenlete

A szerszámél egyenletének ismeretében a transzformációk segítségével meghatározható a forgácsolt felület egyenlete. A transzformáció folyamatát a 3.4. ábrán mutatom be a 2.2. fejezetben leírt bázisértékekre. A 3.11. egyenletben megadtam a csavarvonalú forgácsoló él egyenletét (3.4.a) ábra). A 3.2. egyenletben leírt transzformáció a görbe adott idő alatti elfordulását és (kiegészítő eltolás alkalmazásánál) a lineáris elmozdulását okozza, ahogy a 3.4.b) ábrán látható. A 3.3. egyenlet tulajdonképpen áthelyezi a koordináta-rendszer z_s tengelyvonalát a tengelytávolságnyra lévő z_m tengelyre (3.4.c) ábra). Végül ezen tengelyvonal körül forgatja meg a munkadarab forgómozgásának megfelelő szögelfordulással a szintén forgó szerszámél egyenletét, így megkapva az él által súrolt felületet az idő függvényében a 3.4. d) ábra szerint.



3.4. ábra. A forgácsolt felület generálása a szerszámél görbéjéből
Koordináta-rendszerek: a) $K_{s,m}$ b) $K_{s,a}$ c) $K_{m,a}$ d) $K_{m,m}$

A forgácsoló él a szerszám mozgó koordináta-rendszerében megadott 3.11. egyenletét a 3.8. eredő transzformációs egyenletbe beírva kapom meg az él által a térben súrolt pontokat a munkadarab mozgó koordináta-rendszerében megadva. Így a 3.12. egyenlet a csavarvonal p paraméterétől és az idő t paraméterétől függő kétparaméteres vektor-egyenlet lesz.

$$\mathbf{r}_{mm}(p, t) = \begin{bmatrix} r_s [\cos(p + \omega_s t - \omega_m t) - \cos(\omega_m t)] - r_m \cos(\omega_m t) \\ r_s [\sin(p + \omega_s t - \omega_m t) + \sin(\omega_m t)] + r_m \sin(\omega_m t) \\ r_s p \operatorname{ctg}(\lambda_s) - v_{s,a} t \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

3.2.3 A forgácsolt felület alapsíkbeli metszete

A forgácsolt felület kétparaméteres egyenletéből (3.12. egyenlet) származtatom a forgácsolt felület alapsíkbeli metszetét, mely szükséges többek között a forgácskeresztmetszet geometriai jellemzőinek és az elméleti érdekességi paraméterek meghatározásához. Az alapsík a szerszám kiválasztott pontján átmenő sík, mely merőleges a forgácsoló sebességre, azaz itt a munkadarab forgó mozgásából adódó kerületi sebességre. Esetemben a $K_{m,m}$ koordináta-rendszerben a ζ_m és ξ_m tengelyek által kifeszített síkban keresem a forgácsolt felület metszetének egyenletét. A 3.12. egyenlet ezen síkbeli metszetét kapom, amikor a vektor-egyenlet η_m irányú összetevője nullával egyenlő (3.13. egyenlet).

$$\eta_m = r_s[\sin(p + \omega_s t - \omega_m t) + \sin(\omega_m t)] + \sin(\omega_m t)r_m = 0 \quad (3.13)$$

A felírt feltétel alapján meg tudom adni a p paramétert a t időparaméter függvényében. Így a 3.14. egyenletben tulajdonképpen azt fejezem ki, hogy a szerszámél különböző pontjai (amelyeket a p határoz meg) melyik időpillanatban érintik a munkadarab szimmetriasíkját.

$$p(t) = -\arcsin\left[\frac{\sin(\omega_m t)(r_s + r_m)}{r_s}\right] + (\omega_m - \omega_s)t \quad (3.14)$$

A 3.14. egyenletet a 3.12. egyenletbe visszahelyettesítve kapom meg a forgácsolt felület ξ_m és ζ_m irányokra vonatkozó egyparaméteres egyenletrendszerét a t időparaméter függvényében (3.15. és 3.16. egyenletek).

$$\xi_m(t) = r_s \left[\sqrt{1 - \left(\frac{\sin(\omega_m t)(r_s + r_m)}{r_s}\right)^2} - \cos(\omega_m t) \right] - r_m \cos(\omega_m t) \quad (3.15)$$

$$\zeta_m(t) = r_s \operatorname{ctg}(\lambda_s) \left(\omega_m t - \omega_s t - \arcsin\left[\frac{\sin(\omega_m t)(r_s + r_m)}{r_s}\right] \right) - v_{s,a} t \quad (3.16)$$

A forgácsolt felület egyenletrendszeréből a megmunkált felület származtatható, így például a forgácskeresztmetszet és az elméleti érdekesség is jellemezhető. Azonban többek között a forgácsot jellemző paraméterek közül a forgács szélesség matematikai-analitikai meghatározásához (a függvény ívhosszának számításakor az integrálás elvégzéséhez) a $\xi_m(t)$, $\zeta_m(t)$ egyparaméteres egyenletrendszer alak helyett célravezetőbb a $\xi_m(\zeta_m)$ egyváltozós függvény alak használata. A t paraméter kifejezése az előbbi egyenletekből azonban nem ad a műszaki gyakorlatban is jól kezelhető összefüggést, mivel a t paramétert többszörösen összetett függvények is tartalmazzák. Ezért szükséges függvényközelítés.

A forgácsolt felület függvényének közelítéséhez a rendelkezésre álló lehetőségek közül Taylor-sor szerinti hatványsorba fejtés alkalmazása került kiválasztásra, mivel trigonometrikus és hiperbolikus jellegű függvények elhanyagolható hiba mellett közelíthetőek. A hiba minimalizálásának érdekében nem a teljes függvényt, hanem a 3.16. egyenletben látható inverz szinusz függvényt közelítem. A tárgyalt tag $t = 0$ környezetében vett másodrendű Taylor-sorba fejtésének eredménye a 3.17. egyenletben, a negyedrendű sorba fejtés eredménye a 3.18. egyenletben látható. A rendűség növelésével

csökken a hiba mértéke, azonban nő a közelítés komplexitása, ahogy a bemutatott két egyenlet alapján egyértelműen látható. A levezetés további részében a másodrendű közelítés eredménye kerül bemutatásra.

$$\arcsin \frac{\sin(\omega_m t)(r_s + r_m)}{r_s} = \frac{\omega_m t(r_s + r_m)}{r_s} \quad (3.17)$$

$$\arcsin \frac{\sin(\omega_m t)(r_s + r_m)}{r_s} = \frac{\omega_m t(r_s + r_m)(6r_s^2 + 2\omega_m^2 r_m r_s t^2 + \omega_m^2 r_m^2 t^2)}{6r_s^3} \quad (3.18)$$

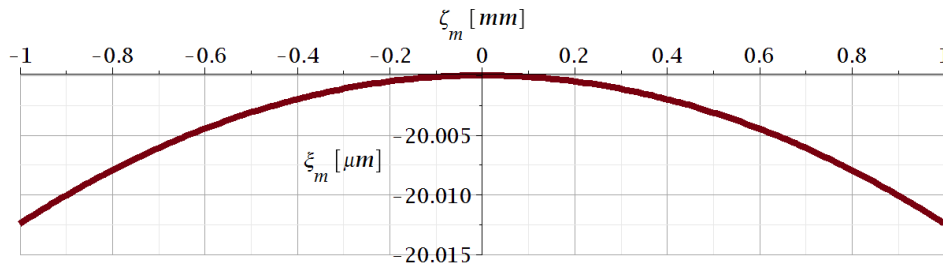
A 3.17. egyenlet szerinti helyettesítést a 3.16. egyenletben elvégezve a t paraméter értékére a ζ_m függvényében adódik az összefüggés (3.19. egyenlet).

$$t(\zeta_m) = -\frac{\zeta_m}{\operatorname{ctg}(\lambda_s)\omega_m r_m + \operatorname{ctg}(\lambda_s)\omega_s r_s + v_{s,a}} \quad (3.19)$$

A 3.18. egyenletet a 3.15. egyenletbe helyettesítve a keresett egyváltozós $\xi_m(\zeta_m)$ függvény adódik (3.20. egyenlet), melynek segítségével matematikai-analitikai alapokon meghatározom többek között a forgácsot és az elméleti érdekességet jellemző paramétereket.

$$\begin{aligned} \xi_m(\zeta_m) = & \sqrt{r_s^2 - \left((r_s + r_m) \sin \frac{\zeta_m \omega_m \tan(\lambda_s)}{\omega_m r_m + \omega_s r_s + v_{s,a} \tan(\lambda_s)} \right)^2} - \\ & - (r_s + r_m) \cos \frac{\zeta_m \omega_m \tan(\lambda_s)}{\omega_m r_m + \omega_s r_s + v_{s,a} \tan(\lambda_s)} \end{aligned} \quad (3.20)$$

A 3.20. egyenlet által leírt görbét mutatja a 3.5. ábra egy konkrét esetre ($r_s = 60$ mm, $r_m = 80$ mm, $\omega_s = 0,3$ 1/s, $\omega_m = 60$ 1/s, $\lambda_s = 30^\circ$, $l_m = 20$ mm). A közelítés hibája – az 1 mm előtoláshoz tartozó – $\zeta_m = 0,5$ mm értéknél a függvényanalízis szerint $H \leq 0,0002292$ mm, amennyiben $r_s \geq 10$ mm, $r_m \geq 10$ mm, $\lambda_s \leq 50^\circ$ (az egyéb paraméterek tetszőlegesek lehetnek).



3.5. ábra. A forgácsolt felület alapsíkbeli metszete (példa)

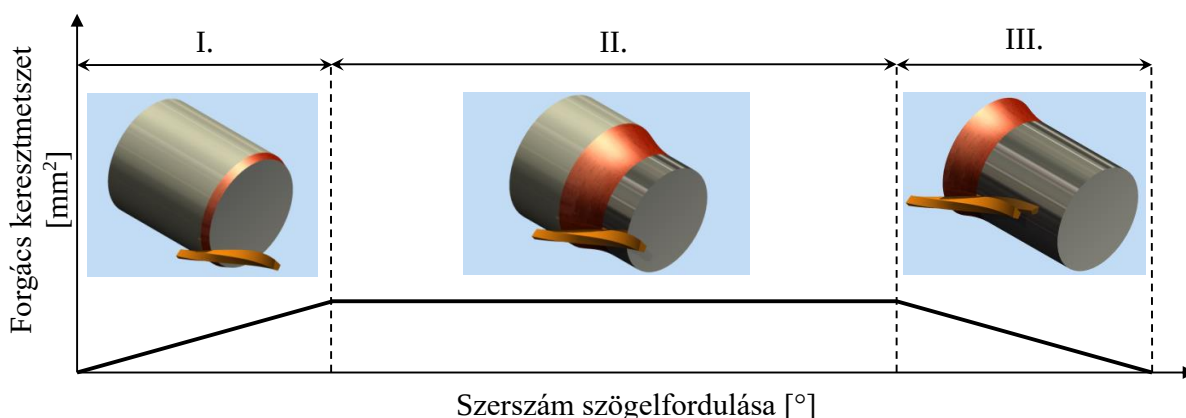
4 FORGÁCSJELLEMZŐK ÉRTÉKEINEK MEGHATÁROZÁSA

A forgácsoló rendszerben értelmezhető forgácsjellemzők elméleti vizsgálatához először értelmezem a forgácsleválasztás szakaszait a forgácskeresztmetszet változásának függvényében. Ezután a forgácskeresztmetszetet, a forgácsszélességet és a forgácsvastagságot határozom meg és megadom számításuk módját. Végezetül a kidolgozott összefüggésekkel megvizsgálom, hogy a rotációs esztergálás paraméterei hogyan befolyásolják a forgács geometriai jellemzőit.

4.1 A forgácsleválasztás jellege és szakaszai

A rotációs esztergálásnál a szerszám lassú és a munkadarab gyors forgó mozgása miatt a forgácsleválasztás folyamatos, hasonlóan a hosszfelőtolásos esztergáló eljáráshoz. A folyamat azonban a speciális geometriájú szerszám és kinematika következtében a forgácskeresztmetszet-változás szempontjából eltér, ugyanis a csavarvonalú él és a lassú körrelőtolás miatt a megmunkálás során három szakaszt lehet elkülöníteni a 4.1. ábrán látható módon, melyeknek megnevezései a következők:

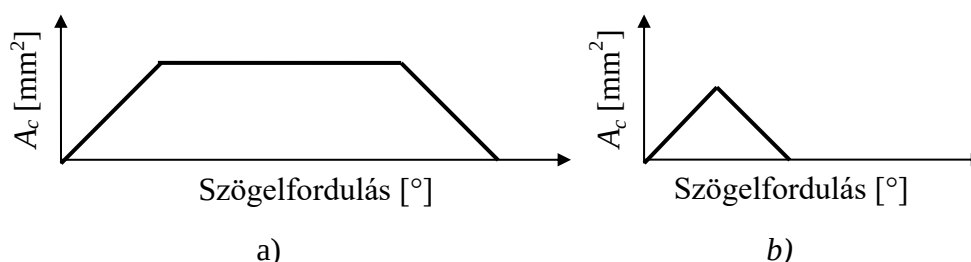
- I. Bekezdési szakasz (növekvő keresztmetszetű forgács)
- II. Állandósult szakasz (állandó keresztmetszetű forgács)
- III. Befejező szakasz (csökkenő keresztmetszetű forgács)



4.1. ábra. A forgácsolási folyamat szakaszai rotációs esztergálásnál

Első lépésként a szerszám lassú elforgása közben a szimmetriasík alatt megérinti a munkadarabot, majd a további elfordulás következtében folyamatosan növekszik a forgácskeresztmetszet (I.). Ez az első, Bekezdési szakasz addig értelmezendő, amíg a szerszám éle el nem éri a munkadarab megmunkált felületének átmérőjét, amikortól

állandósul a forgácskeresztmetszet (II.). Ez a szakasz addig tart, amíg a szerszám nem kezd el kilépni a munkadarabból, mivel ekkortól folyamatosan csökken a forgácskeresztmetszet (III). Ez a harmadik, Befejező szakasz az anyagleválasztás megszűnésével ér véget.



4.2. ábra. Forgácsleválasztás Állandósult szakasz létrejöttével (a), illetve elmaradásával (b)

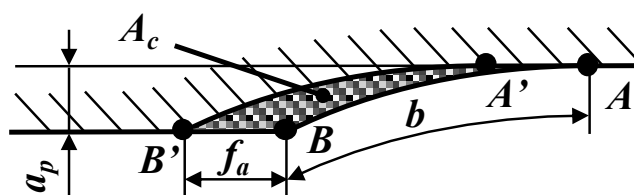
Az első és a harmadik szakasz hagyományos esztergálás során is megfigyelhető, azonban ott nagyságrendekkel kisebb mértékben jelentkeznek. Rotációs esztergáláskor a geometriai jellemzők függvényében változik a 3 szakasz egymáshoz viszonyított aránya, általános esetben az Állandósult szakasz a domináns (4.2.a. ábra). Előfordulhat olyan eset is, hogy az állandósult szakasz nem következik be. Ekkor a munkadarab megmunkálható felületének hossza kisebb, mint a Bekezdési és a Befejező szakaszok hosszának az összege. Erre mutat példát a 4.2.b. ábra.

4.2 Számítási módszer a forgácsvastagság és –szélesség meghatározására

A megmunkáló eljárások során keletkező forgács adatai fontos mutatók a forgácsleválasztás jellemzéséhez. Többek között a leválasztandó és a leválasztott forgács geometriai tulajdonságait, az alakváltozási tényezőket, valamint a forgácsalakot vizsgálják. Ezen jellemzők elméleti vizsgálatához meghatározom a forgács vastagságának és szélességének egyenletét a rotációs esztergálást jellemző kinematikai és geometriai paraméterek függvényében. A forgácsolási folyamat három szakaszát külön vizsgálom az egyes szakaszokban tapasztalható különbségek miatt.

4.2.1 Az állandó forgácskeresztmetszet szakaszának vizsgálata

A forgácskeresztmetszetet a különböző eljárásoknál a forgácsoló sebességre merőleges síkban (alapsíkban) értelmezzük [33]. Ehhez szükséges a forgácsolt felület megadása az alapsíkban, melyet a 3.2.2 fejezetben meghatároztam. Az elméleti forgácskeresztmetszet alakja az eredő tengelyirányú előtolás segítségével határozható meg (4.3. ábra).



4.3. ábra. Az Állandósult forgácskeresztmetszet alakja

Az eljárásnál a maráshoz hasonló forgácsalak képződik. A forgács vastagsága a szerszám éle mentén folyamatosan változik: a megmunkálandó felületnél ($B - B'$ pontok környezete) lesz a legnagyobb, míg a megmunkált felület környezetében éri el a 0 értéket (A pont). A forgácsoláselméletben az ilyen keresztmetszetekre alkalmazottaknak megfelelően egyenértékű forgácsvastagságot (h_e) alkalmazok. Ez azt a forgácsoló él alapsíkbeli vetületére merőleges állandó anyagvastagságot jelenti, amelynél a forgácskeresztmetszet megegyezik a változó anyagvastagságú esettel.

A fogásmélység, a forgács szélesség és a munkadarab-fordulatonkénti eredő axiális előtolás segítségével az ekvivalens forgácsvastagság a 4.1. egyenlet szerint számítandó.

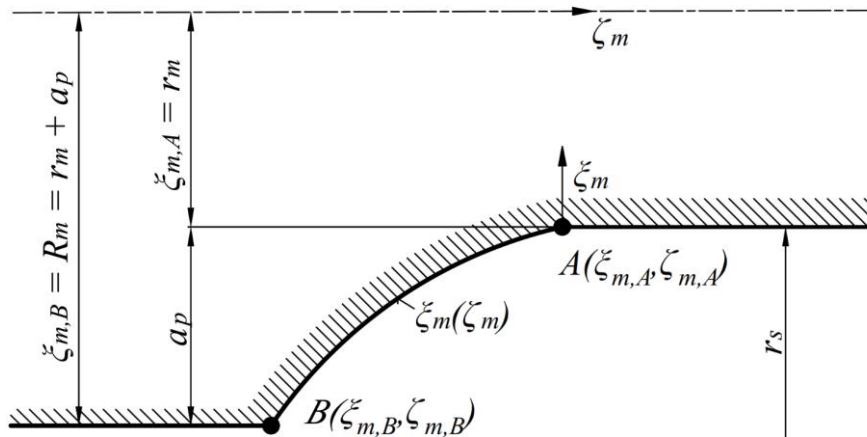
$$A_c = a_p \cdot f_a = b \cdot h_e \quad \longrightarrow \quad h_e = \frac{a_p \cdot f_a}{b} \quad (4.1)$$

Látható, hogy h_e számításához szükséges a forgács szélesség meghatározása. A főél forgácsleválasztást végző szakasza az él és a munkadarab megmunkált felületének érintkezési pontjától kezdődik ($\kappa_r = 0^\circ$) és az él és a munkadarab megmunkálandó felületének találkozási pontjáig tart. Ennek a hossza a forgácsoló él szerszám alapsíkban értelmezett egyenletének ívhossza a nevezett pontok között. Egy általános $f(x)$ függvény ívhosszát az $\alpha < x < \beta$ tartományban a 4.2. egyenlet szerint határozzuk meg.

$$S = \int_{\alpha}^{\beta} \sqrt{1 + (f'(x))^2} dx \quad (4.2)$$

Az egyenletben szereplő változók értelmezése a 4.4. ábrát felhasználva történik. A $K_{m,m}$ koordináta-rendszer ζ_m tengelye egybeesik a munkadarab szimmetriatengelyével, a ξ_m tengely pedig a munkadarabhoz képest radiális irányban van és a szerszámtól a munkadarab felé mutat. Az ívhossz számításánál alkalmazandó függvénye $\xi_m(\zeta_m)$ -ként jelölt, mely a forgácsoló él alapsíkbeli vetületének egyenlete. A 4.2. egyenlet integrálásánál a felső határt (b) az A pont koordinátái (4.3. egyenlet) alapján határozom meg, ami ez esetben: $\beta = \zeta_{m,A} = 0$.

$$\xi_{m,B} = -r_m, \quad \zeta_{m,B} = 0 \quad (4.3)$$



4.4. ábra. A forgácsolt felület jellegzetes pontjai

Az alsó integrálási határ a B pont $\zeta_{m,B}$ koordinátájával egyezik meg, mely a munkadarab megmunkálendő felületének sugarával (R_m) egyenlő, így B pontra felírható a 4.4. egyenlet.

$$\xi_{m,B} = \xi_m(\zeta_{m,B}) = -R_m = -(r_m + a_p) \quad (4.4)$$

Ezt az összefüggést figyelembe véve a forgácsoló él 3.20. egyenletéből meghatározom az alsó integrálási határt a 4.4. egyenlet szerinti feltétel alapján. A 4.4. ábrán látható B pont ζ_m irányú koordinátájának ($\zeta_{m,B}$) számításához szükséges összefüggést a 4.5. egyenlet mutatja.

$$\zeta_{m,B} = \left(\frac{v_{s,a}}{\omega_m} + \frac{\omega_s r_s + \omega_m r_m}{\omega_m \operatorname{tg} \lambda_s} \right) \arctan \frac{\sqrt{a_p(a_p + 2r_m)(a_p + 2r_m + 2r_s)(2r_s - a_p)}}{2r_m^2 + 2r_m(a_p + r_s) + a_p^2} \quad (4.5)$$

A 4.2.-4.5. egyenletekből a forgácsoló él fogásban lévő részének hosszúsága (vagyis az elméleti forgácsszélesség) adódik a 4.6. egyenlet szerint.

$$b = \int_{\zeta_{m,B}}^{\zeta_{m,A}} \sqrt{1 + (\xi'_m(\zeta_m))^2} d\zeta_m = \int_{\zeta_{m,B}}^0 \sqrt{1 + (\xi'_m(\zeta_m))^2} d\zeta_m \quad (4.6)$$

A kijelölt integrálás elvégzéséhez az integranduszban található többszörösen összetett függvény miatt matematikai közelítés szükséges. A függvény alakja miatt a 3.2.3. fejezetben látott módon itt is a függvény harmadrendű Taylor-hatványsorba fejtése mellett döntöttem. A 3.20. és a 4.5. egyenletet a 4.6. egyenletbe beírva és a kijelölt műveleteket elvégezve adódik a forgácsszélesség számítóképlete a 4.7. egyenlet szerint. A közelítés hibája a függvényanalízis szerint $H \leq 0,0005339$ mm, amennyiben $r_s \geq 5$ mm, $r_m \geq 5$ mm, $\lambda_s \leq 60^\circ$ (az egyéb paraméterek tetszőlegesek lehetnek).

$$b = \frac{[\omega_m r_m (r_s + r_m)]^2 + \frac{6r_s^2 [v_{s,a} + (\omega_s r_s + \omega_m r_m) \operatorname{ctg}(\lambda_s)]^2}{\arctan^2 \frac{\sqrt{a_p(a_p + 2r_m)(a_p + 2r_m + 2r_s)(2r_s - a_p)}}{2r_m^2 + 2r_m(a_p + r_s) + a_p^2}}}{\frac{6r_s^2 \omega_m [v_{s,a} + (\omega_s r_s + \omega_m r_m) \operatorname{ctg}(\lambda_s)]}{\arctan^3 \frac{\sqrt{a_p(a_p + 2r_m)(a_p + 2r_m + 2r_s)(2r_s - a_p)}}{2r_m^2 + 2r_m(a_p + r_s) + a_p^2}}} \quad (4.7)$$

Az 4.1. egyenlet alapján határozom meg az egyenértékű forgácsvastagságot.

$$h_e = \frac{a_p \cdot f_a}{b} = \frac{a_p \cdot 2\pi \frac{\omega_s}{\omega_m} \left[\frac{r_t}{\operatorname{tg} \lambda_s} + \frac{v_{s,a}}{\omega_s} \right]}{\int_{\zeta_B}^0 \sqrt{1 + (\xi'(\zeta))^2} d\zeta} \quad (4.8)$$

A 4.8. egyenletben a kijelölt műveleteket elvégezve (felhasználva a 4.5. és 4.7. egyenleteket) az ekvivalens forgácsvastagság keresett összefüggése adódik a 4.9. egyenletben látható formában. A különböző geometriai és kinematikai paramétereket behelyettesítve így számítható az élt terhelő átlagos anyagvastagság különböző beállításoknál.

$$h_e = \frac{\frac{12\pi a_p r_s^2 [v_{s,a} + \omega_s r_s \operatorname{ctg}(\lambda_s)] [v_{s,a} + (\omega_s r_s + \omega_m r_m) \operatorname{ctg}(\lambda_s)]}{\arctan^3 \sqrt{\frac{a_p(a_p + 2r_m)(a_p + 2r_m + 2r_s)(2r_s - a_p)}{2r_m^2 + 2r_m(a_p + r_s) + a_p^2}}}}{(\omega_m r_m(r_s + r_m))^2 + \frac{6r_s^2 [v_{s,a} + (\omega_s r_s + \omega_m r_m) \operatorname{ctg}(\lambda_s)]^2}{\arctan^2 \sqrt{\frac{a_p(a_p + 2r_m)(a_p + 2r_m + 2r_s)(2r_s - a_p)}{2r_m^2 + 2r_m(a_p + r_s) + a_p^2}}}} \quad (4.9)$$

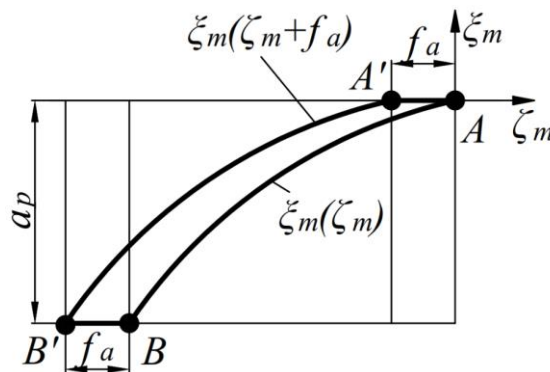
4.2.2 A Bekezdési szakasz analízise

Az elemzést a 4.5. ábra segítségével végzem el, amelyen két élhelyzetet rajzoltam be, melyek között előtolásnyi (f_a) különbség van. A két görbét elmetszettem a $\xi_m = 0$ és $\xi_m = a_p$ egyenesekkel. Így matematikailag körbehatároltam az elméleti forgácskeresztmetszetet az alapsíkban. A munkadarab véglapját a levezetés további részében a ζ_k keresőegyenessel reprezentálom, amely a Bekezdési szakasz során a B' pontnál metszi el a forgácskeresztmetszetet, és a fogásba lépés során a pozitív ζ_m irányban halad.

Az elemzés során a forgács szélesség vizsgálatánál a forgácskeresztmetszetet közrefogó két élszakasz átlagos értékét használom. Azért került így meghatározásra, mert a $\xi_m(\xi_m + f_a)$ egyenlettel leírt élszakasz használatával a valós viszonyokhoz képest kisebb lenne az átlagos forgácsvastagság értéke. Ugyanakkor a $\xi_m(\xi_m)$ egyenlettel leírt élszakaszt használva a valós viszonyoktól nagyobb átlagos forgácsvastagsággal dolgoznék. Ezért a két élszakaszt kiátlagolva vizsgálhatóak a reális viszonyok.

A 4.5. ábrán látható jellegzetes pontok a 4.10. egyenlet azonosságaival írhatóak fel.

$$\zeta_{m,A} = 0, \quad \zeta_{m,A'} = \zeta_{m,A} - f_a = -f_a, \quad \zeta_{m,B'} = \zeta_{m,B} - f_a \quad (4.10)$$

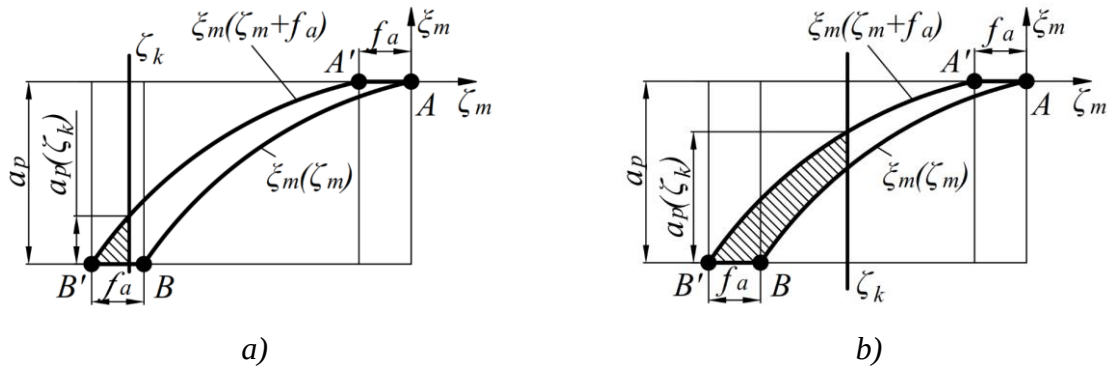


4.5. ábra. A forgácskeresztmetszet alakja

A munkadarab véglapjának mozgása során a következő intervallumokat értelmezem:

- | | | | |
|----|---|---------------|---|
| 0. | $\zeta_k = \zeta_{m,B'}$ | $\rightarrow$ | 1. érintkezés a B' pontban |
| 1. | $\zeta_{m,B'} < \zeta_k \leq \zeta_{m,B}$ | $\rightarrow$ | háromszög alakú forgács |
| 2. | $\zeta_{m,B} < \zeta_k \leq \zeta_{m,A'}$ | $\rightarrow$ | trapéz alakú forgács |
| 3. | $\zeta_{m,A'} < \zeta_k < \zeta_{m,A}$ | $\rightarrow$ | átmeneti alakú forgács |
| 4. | $\zeta_{m,A} \leq \zeta_k$ | $\rightarrow$ | kialakul az állandó keresztmetszetű forgács |

A 0. időpillanatban a forgácskeresztmetszet jellemző paraméterei még zérussal egyenlők, hiszen ekkor történik meg a munkadarab megérintése. Az 1. intervallumban tapasztalható háromszög alakú forgács látható a 4.6.a. ábra jelölt részén.



4.6. ábra. A Bekezdési szakasz első két intervalluma:
Háromszög (a) és Trapéz (b) alakú forgács

A ζ_k függvényében nő az effektív fogásmélység ($a_p(\zeta_k)$) az 1. intervallum során. A forgácskeresztmetszet a 4.11. egyenletben látható kifejezés megoldásával, a forgácsszélesség a 4.12. egyenlettel számítandó.

$$\begin{aligned}
 A_c^{k1}(\zeta_k) &= a_p \cdot (\zeta_k - \zeta_{m,B'}) - \int_{\zeta_k}^{\zeta_{m,B'}} \xi(\zeta + f_a) d\zeta \\
 &= a_p \cdot ((\zeta_k + f_a) - \zeta_{m,B}) - \int_{\zeta_k + f_a}^{\zeta_{m,B}} \xi(\zeta) d\zeta
 \end{aligned} \tag{4.11}$$

$$b^{k1}(\zeta_k) = \frac{\int_{\zeta_k}^{\zeta_{m,B'}} \sqrt{1 + [\xi'(\zeta + f_a)]^2} d\zeta + 0}{2} = \frac{\int_{\zeta_k + f_a}^{\zeta_{m,B}} \sqrt{1 + [\xi'(\zeta)]^2} d\zeta}{2} \tag{4.12}$$

A második intervallum (4.6.b. ábra) kezdetén ($\zeta_k = \zeta_{m,B}$) az él eléri az első olyan pontot a munkadarab alkotóján (B pont), ahol már forgácsot választott le egy munkadarabfordulatot megelőzően. Így ebben az intervallumban már összetettebb, trapézhoz hasonló alakú forgács képződése kezdődik, mely keresztmetszetét a 4.13. egyenlettel lehet számítani.

$$A_c^{k2}(\zeta_k) = a_p \cdot f_a + \int_{\zeta_k}^{\zeta_{m,B}} \xi(\zeta) d\zeta - \int_{\zeta_k}^{\zeta_{m,B'}} \xi(\zeta + f_a) d\zeta = a_p \cdot f_a - \int_{\zeta_k + f_a}^{\zeta_k} \xi(\zeta) d\zeta \tag{4.13}$$

Az átlagos forgácsszélességet a $\xi(\zeta+f_a)$ függvény $\zeta_{m,B'} - \zeta_k$ tartományon és a $\xi_m(\zeta_m)$ függvény $\zeta_{m,B} - \zeta_k$ tartományon számolt ívhosszainak átlagolásával kapjuk a 4.14. egyenlet megoldásával.

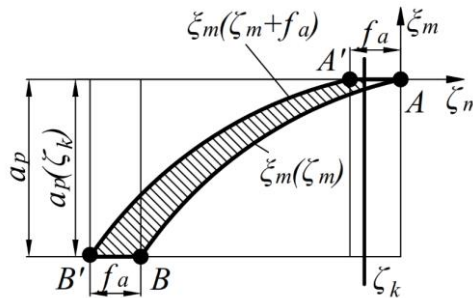
$$\begin{aligned} b^{k2}(\zeta_k) &= \frac{\int_{\zeta_k}^{\zeta_{m,B'}} \sqrt{1 + [\xi'(\zeta + f_a)]^2} d\zeta + \int_{\zeta_k}^{\zeta_{m,B}} \sqrt{1 + [\xi'(\zeta)]^2} d\zeta}{2} \\ &= \int_{\zeta_k}^{\zeta_{m,B}} \sqrt{1 + [\xi'(\zeta)]^2} d\zeta + \frac{\int_{\zeta_k+f_a}^{\zeta_k} \sqrt{1 + [\xi'(\zeta)]^2} d\zeta}{2} \end{aligned} \quad (4.14)$$

A forgácskeresztmetszet állandósulása előtt a 3. intervallum a Bekezdési szakasz utolsó összetevője, melyet jellemző átmeneti alakú forgácsalak a 4.7. ábrán látható. Az intervallum kezdetét jelentő $\zeta_k = \zeta_{A'}$ elérését követően $a_p(\zeta_k) = a_p$ teljesül. A forgácskeresztmetszet a 4.15. egyenlet szerint számítandó.

$$A_c^{k3}(\zeta_k) = a_p \cdot f_a + \int_{\zeta_k}^{\zeta_{m,B}} \xi(\zeta) d\zeta - \int_{\zeta_{A'}}^{\zeta_{m,B'}} \xi(\zeta + f_a) d\zeta = a_p \cdot f_a - \int_0^{\zeta_k} \xi(\zeta) d\zeta \quad (4.15)$$

Ahogy ζ_k tart a nullához, úgy közelítünk egyre inkább az Állandósult szakasz 4.1. egyenletben felírt forgácskeresztmetszetéhez. A forgácsszélesség számítása a 3. intervallumban a 4.16. egyenlet szerint történik. A számolt érték itt is az Állandósult szakaszt leíró, 4.6. egyenlet eredményéhez tart.

$$\begin{aligned} b^{k3}(\zeta_k) &= \frac{\int_{\zeta_{m,A'}}^{\zeta_{m,B'}} \sqrt{1 + [\xi'(\zeta + f_a)]^2} d\zeta + \int_{\zeta_k}^{\zeta_{m,B}} \sqrt{1 + [\xi'(\zeta)]^2} d\zeta}{2} \\ &= \int_{\zeta_k}^{\zeta_{m,B}} \sqrt{1 + [\xi'(\zeta)]^2} d\zeta + \frac{\int_0^{\zeta_k} \sqrt{1 + [\xi'(\zeta)]^2} d\zeta}{2} \end{aligned} \quad (4.16)$$



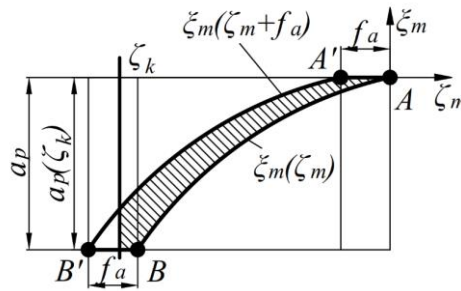
4.7. ábra. A Bekezdési szakasz harmadik intervalluma: Átmeneti alakú forgács

4.2.3 A Befejező szakasz elemzése

A Befejező szakasz forgácskeresztmetszetét leíró geometriai paraméterek meghatározásával folytatom disszertációm. Az elemzésnél itt is a 4.5. ábrát használom. A munkadarab véglapjának mozgása során a következő intervallumokat különböztetem meg:

0. $\zeta_k = \zeta_{m,B'}$ → Befejező szakasz kezdete
1. $\zeta_{m,B'} < \zeta_k \leq \zeta_{m,B}$ → átmeneti alakú forgács
2. $\zeta_{m,B} < \zeta_k \leq \zeta_{m,A'}$ → trapéz alakú forgács
3. $\zeta_{m,A'} < \zeta_k < \zeta_{m,A}$ → háromszög alakú forgács
4. $\zeta_{m,A} \leq \zeta_k$ → nincs fogás

A pozitív ζ_m irányban mozgatott ζ_k egyenes a munkadarabnak azt a véglapját jelenti ebben az esetben, amelynél a Befejező szakasz során a szerszám éle a B' pontban először kezd kilépni a munkadarabból, így csökkenő forgácskeresztmetszetet okozva. Az III. szakasz elemzése során a forgácsszélesség vizsgálatánál ebben az esetben is a forgácskeresztmetszetet közrefogó két élszakasz átlagos értékét használom a 4.2.2. fejezetben leírt módon. A 4.10. egyenletben leírt azonosságok a Befejező szakasz elemzése során is érvényesek.

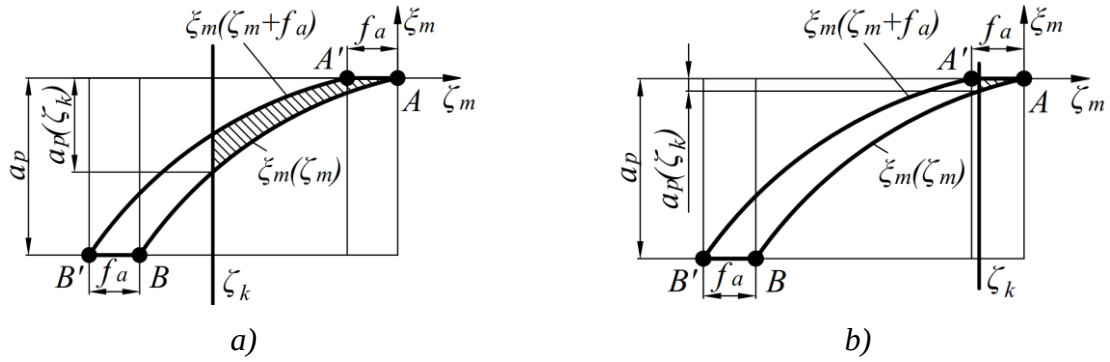


4.8. ábra. A Befejező szakasz első intervalluma: Átmeneti alakú forgács

A Befejező szakasz kezdetének jellegzetes forgácsalakja látható a 4.8. ábrán. A $\zeta_m = \zeta_k$ egyenesnél a munkadarab véglapja látható a B és a B' pontok között. Ebben az esetben a fogásmélység nem változik ($a_p(\zeta_k) = a_p$), a forgácskeresztmetszet a 4.17. egyenletben látható levezetés eredményeként kapott kifejezéssel számítható. A forgácsszélesség a 4.18. egyenlettel számítható, amely az átlagos érték csökkenését mutatja az Állandósult szakaszban számított forgácsszélességhez képest.

$$\begin{aligned}
 A_c^{f1}(\zeta_k) &= a_p \cdot (\zeta_{m,B} - \zeta_k) - \int_{\zeta_{m,B}}^{\zeta_k} \xi(\zeta + f_a) d\zeta + \int_{\zeta_{m,A}}^{\zeta_{m,B}} \xi(\zeta) d\zeta - \int_{\zeta_{m,A'}}^{\zeta_{m,B}} \xi(\zeta + f_a) d\zeta \\
 &= a_p \cdot (\zeta_{m,B} - \zeta_k) + \int_{\zeta_k + f_a}^{\zeta_{m,B}} \xi(\zeta) d\zeta
 \end{aligned} \tag{4.17}$$

$$\begin{aligned}
 b^{f1}(\zeta_k) &= \frac{\int_{-\zeta_{m,A'}}^{\zeta_k} \sqrt{1 + [\xi'(\zeta + f_a)]^2} + \int_{\zeta_{m,A}}^{\zeta_{m,B}} \sqrt{1 + [\xi'(\zeta)]^2}}{2} \\
 &= \int_0^{\zeta_k + f_a} \sqrt{1 + [\xi'(\zeta)]^2} + \frac{\int_{\zeta_k + f_a}^{\zeta_{m,B}} \sqrt{1 + [\xi'(\zeta)]^2}}{2}
 \end{aligned} \tag{4.18}$$



4.9. ábra. A Befejező szakasz második és harmadik intervalluma:
Trapéz (a) és Háromszög (b) alakú forgács

A fogásból való kilépés következő intervalluma (4.9.a. ábra) során a megmunkálandó felület már teljesen el lett távolítva a munkadarabról, a forgácsolt felület legnagyobb külső átmérője és az effektív fogásmélység $a_p(\zeta_k)$ folyamatosan csökken. A fokozatosan csökkenő forgácskeresztmetszet a 4.19. egyenlettel számolható a ζ_k függvényében, az átlagos forgácsszélessége a matematikai átalakításokat követően a 4.20. egyenletet kapom.

$$A_c^{f2}(\zeta_k) = \int_{\zeta_{m,A}}^{\zeta_k} \xi(\zeta) d\zeta - \int_{\zeta_{m,A'}}^{\zeta_k} \xi(\zeta + f_a) d\zeta = \int_{\zeta_k + f_a}^{\zeta_k} \xi(\zeta) d\zeta \quad (4.19)$$

$$\begin{aligned} b^{f2}(\zeta_k) &= \left(\int_{\zeta_{m,A'}}^{\zeta_k} \sqrt{1 + [\xi'(\zeta + f_a)]^2} + \int_{\zeta_{m,A}}^{\zeta_k} \sqrt{1 + [\xi'(\zeta)]^2} \right) / 2 = \\ &= \int_0^{\zeta_k + f_a} \sqrt{1 + [\xi'(\zeta)]^2} + \left(\int_{\zeta_k + f_a}^{\zeta_k} \sqrt{1 + [\xi'(\zeta)]^2} \right) / 2 \end{aligned} \quad (4.20)$$

A szerszám fogásból való kilépésének utolsó intervalluma során a 4.9.b. ábrán látható, háromszög jellegű forgácsalak leválasztása történik. A munkadarab felületének a véglaptól visszafelé számított, $\zeta_{m,A'} - \zeta_{m,A}$ közötti előtolásnyi hosszúságú palástján tovább csökken a forgácskeresztmetszet és az effektív fogásmélység ($a_p(\zeta_k)$), míg a jellemző geometriai paraméterek értékei a 0-hoz tartanak. Ebből következik, hogy a munkadarab felületének ezen részén eltérő topográfia keletkezésére lehet számítani. A forgácskeresztmetszet a 4.21. egyenlettel, a forgácsszélesség a 4.22. egyenlettel határozható meg, melyek értékei jelentősen kisebbek az Állandósult szakaszban számoltoknál. A 4.9.b. ábrán látható, hogy a forgácsoló élnek a $\zeta_k - \zeta_{m,A}$ közötti része fog részt venni a forgácsleválasztásban.

$$A_c^{k3}(\zeta_k) = \int_0^{\zeta_k} \xi(\zeta) d\zeta \quad (4.21)$$

$$b^{f3}(\zeta_m) = \left(\int_{\zeta_{m,A}}^{\zeta_k} \sqrt{1 + [\xi'(\zeta)]^2} + 0 \right) / 2 = \left(\int_{\zeta_{m,A}}^{\zeta_k} \sqrt{1 + [\xi'(\zeta)]^2} \right) / 2 \quad (4.22)$$

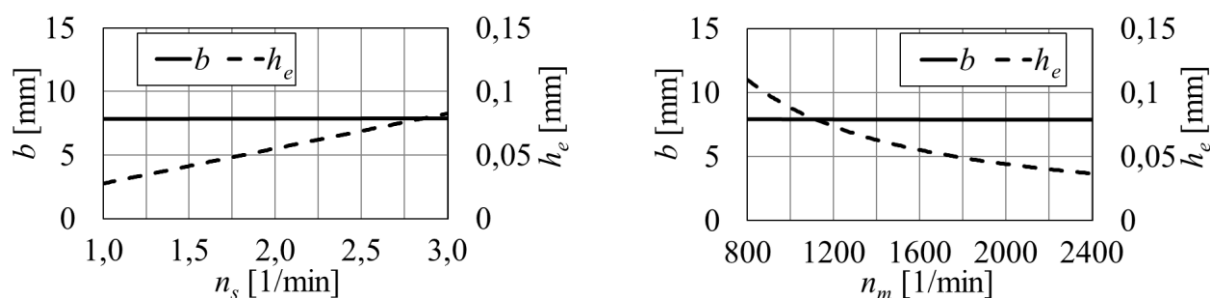
4.3 A forgácskeresztmetszet elméleti értékeinek változása

A forgácsot jellemző geometriai mérőszámok számítási módjainak meghatározását követően az értékek vizsgálata következik. A vizsgálatokat a 2.2. fejezetben megadott tartományban végzem el a korábban kidolgozott számító képletek felhasználásával. Az Állandósult szakasz esetén meghatároztam a forgácsszélesség és vastagság változását a geometriai és kinematikai paraméterek függvényében, a Bekezdési és a Befejező szakasz során elemeztem a forgácskeresztmetszet, -vastagság és -szélesség változását a felületképző pont tengelyirányú elmozdulása során.

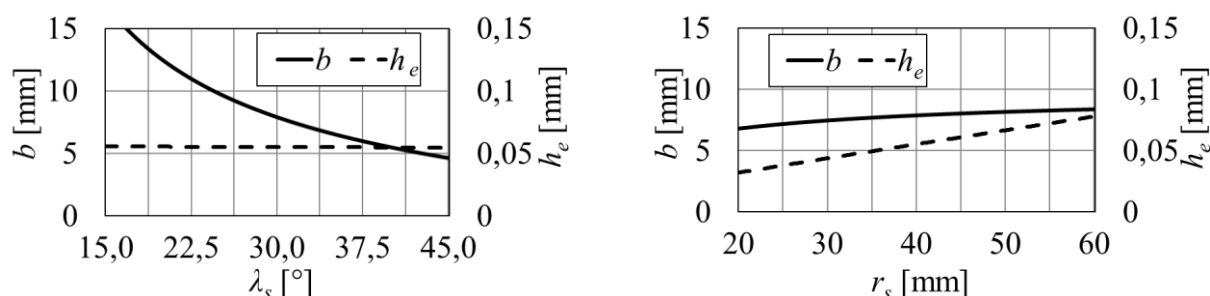
4.3.1 Az Állandósult szakasz vizsgálata

Az állandó keresztmetszetű forgácsleválasztás szakaszában a rotációs esztergálás jellemző paramétereinek változásának hatását elemzem a 2.2 fejezetben leírt módon.

A szerszámfordulat hatását a 4.10. ábra mutatja. A forgácsszélességre nem gyakorol hatást, mivel a geometriai viszonyok változatlanok. Ugyanakkor a forgácsvastagságot az előtolás növelésével arányosan növeli. Az n_s háromszorosára növelése háromszor akkora h_e értéket eredményez. A munkadarab fordulatszáma a szerszám fordulatszámához hasonlóan a forgácsszélességet nem változtatja (4.10. ábra). Ugyanakkor a forgácsvastagságot fordítottan arányosan befolyásolja. 800 1/min-ről 2400 1/min-re növelve a fordulatszámot a forgácsvastagság 66 %-kal csökken.



4.10. ábra. A szerszám (n_s) és a munkadarab (n_m) fordulatszámának hatása

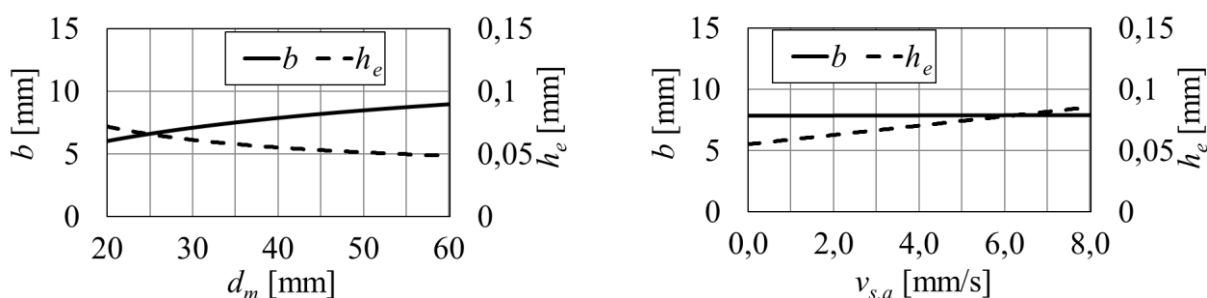


4.11. ábra. A terelőszög (λ_s) és a szerszámsugár (r_s) hatása

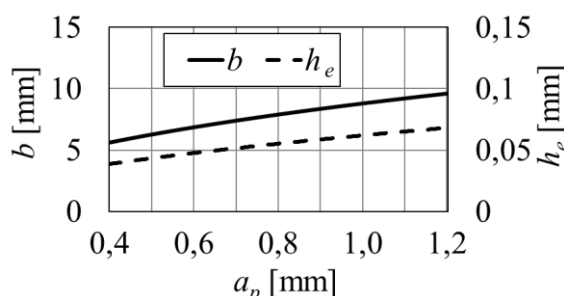
A 4.11. ábrán a terelőszög hatását mutatom be a forgácsszélesség és az ekvivalens forgácsvastagság értékére. Az előbbi fordított arányban áll, ami annak köszönhető, hogy a terelőszög növelésével az él alapsíkkal bezárt szöge növekszik, és ezáltal az alapsíkbeli vetülete kisebbé válik. Így a forgácsoló él működő része is lecsökken. A λ_s 20°-al való növelése közel 0,14 mm csökkenést (73%) okoz a h_e értékében. A forgácsvastagságot a terelőszög elhanyagolható mértékben változtatja a vizsgált tartományban. A szerszámsugár növelése mindkét vizsgált értéket növeli (4.11. ábra), amennyiben a többi paramétert változtatlanul hagyjuk. Ennek oka, hogy ez a paraméter mind a forgácsolt felület geometriai alakját, mind az előtolást megváltoztatja. Háromszoros r_s értéknél a forgácsszélesség 1,23-szorosára, a forgácsvastagság 2,43-szeresére növekszik.

A különböző átmérőjű munkadarab megmunkálásakor azt várhatjuk a 4.12. ábra alapján, hogy a nagyobb átmérőjű külső hengeres felület megmunkálásakor a forgácsszélesség növekedni, a forgácsvastagság csökkenni fog. Ennek oka, hogy az eltérő ívű munkadarabbal a térben máshol találkozunk a szerszámmal, ami miatt az forgácsolt felületet kialakító élszakasz hossza megnő. Háromszor nagyobb átmérő megmunkálásakor (az egyéb feltételek változatlansága mellett) a forgácsszélesség 1,5-szeresére nő, az ekvivalens forgácsvastagság kétharmad részére csökken. A kiegészítő axiális előtoló sebesség (4.12. ábra) a többi kinematikai paraméterhez hasonlóan a forgácsszélességet nem befolyásolja. Azonban az eredő előtolás megnövekedése miatt a forgácsvastagságot növelni fogja. A vizsgált esetekben a $v_{s,a}$ értékének megháromszorozása a h_e értékét 1,24-szeresére növeli meg.

Végezetül a fogásmélység hatása látható a 4.13. ábrán. Ennek a technológiai adatnak a változtatása mindkét vizsgált paramétert azonos mértékben növeli. Háromszor nagyobb fogásmélység esetén a b és a h_e értéke is 70%-kal növekszik meg. A fogásmélység növeli az anyagot leválasztó élszakasz hosszát. Ezzel együtt megnöveli az él azon részének arányát, amely nagyobb anyagvastagságú réteggel találkozik (a 4.5. ábrán a megmunkálandó felülethez közelebbi rész). Ennek következtében az ekvivalens forgácsvastagság számításakor nagyobb részt fog kitenni.



4.12. ábra. A munkadarab átmérő (d_m) és a kiegészítő tengelyirányú előtolás ($v_{s,a}$) hatása



4.13. ábra. Forgácsvastagság (h_e) és -szélesség (b) a fogásmélység függvényében

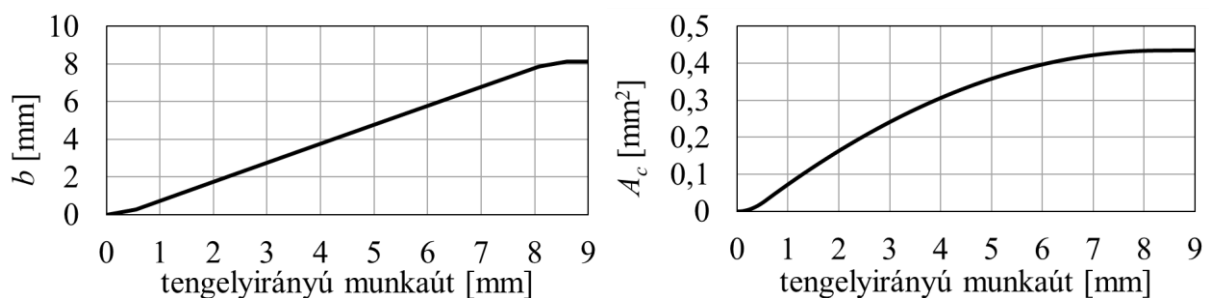
4.3.2 A Bekezdési szakasz elemzése

A változó forgácskeresztmetszetű anyagleválasztási szakaszok közül először a Bekezdési szakaszt vizsgálom a 4.2.2. fejezetben meghatározott egyenletekkel. Az elemzést a 2.2. fejezetben megadott vizsgálati értékekre végeztem el.

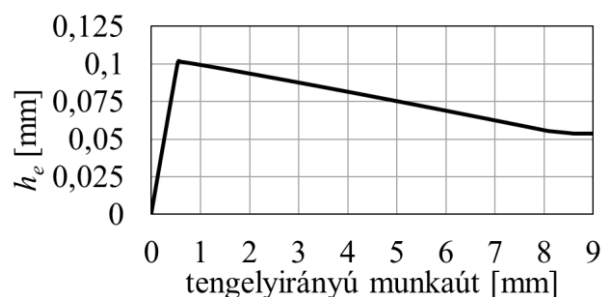
A forgácsszélesség és a forgácskeresztmetszet változását mutatja a Bekezdési szakasz során a 4.14. ábra. A felületképző pont axiális elmozdulása során lineáris a növekedés jellege, a görbében csak két töréspont figyelhető meg a 4.2.2. fejezetben alkalmazott leírásmód miatt. Az 1. töréspont abban a pillanatban következik be, amikor az él először találkozik a már forgácsolt felülettel a munkadarab 1 körülfordulását követően. A második töréspont akkor jelentkezik, amikor a forgácsoló él elérte a munkadarab kész átmérőjét, azonban még 1 munkadarabfordulatra szükség van az állandó forgácskeresztmetszet kialakulására. Ezért ekkor a növekedés mértéke kissé lecsökken.

A forgácskeresztmetszet változását vizsgálva a teljes fogásmélység eléréséig (4.14. ábra) látható, hogy az A_c változása 3 intervallumra bontható. Az 1. részben, mely a Bekezdési szakasz közel 10%-áig tart exponenciális jellegű a forgácskeresztmetszet növekedése, mivel az élszakasz hossza mellett a rá merőleges leválasztandó anyagréteg is növekszik a 4.6. ábrán látható módon. A következő intervallum közel lineáris növekedést mutat, amely a Bekezdési szakasz 10%-ától 60%-áig tart. Itt a forgácsvastagság közel állandó (4.6. ábra). Az utolsó intervallumban az állandó forgácskeresztmetszet eléréséig A_c növekedési üteme lelassul, mivel az él ezen részén már kisebb anyagvastagságot kell eltávolítani (4.7. ábra).

Az ekvivalens forgácsvastagság változását a 4.15. ábrán mutatom be. A forgácskeresztmetszet növekedésének első intervalluma során intenzív növekedése figyelhető meg a végén látható lokális maximumig. A maximum elérését követően csökken az állandó keresztmetszetű szakasznál számolt forgácsvastagság eléréséig. A bekezdés kezdetén a keresztmetszet szélessége és vastagsága egyformán nő, azonban a bekezdés 2. és 3. intervallumában az adott élszakaszra merőleges anyagvastagság csökken, így a számolt ekvivalens forgácsvastagság is csökkenni fog.



4.14. ábra. Forgácsszélesség és forgácskeresztmetszet változása a Bekezdési szakasz során



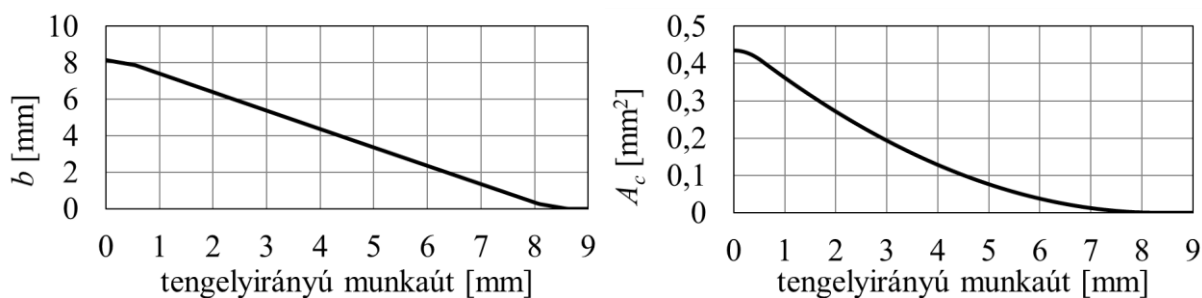
4.15. ábra. Az ekvivalens forgácsvastagság változása a Bekezdési szakasz során

4.3.3 A Befejező szakasz vizsgálata

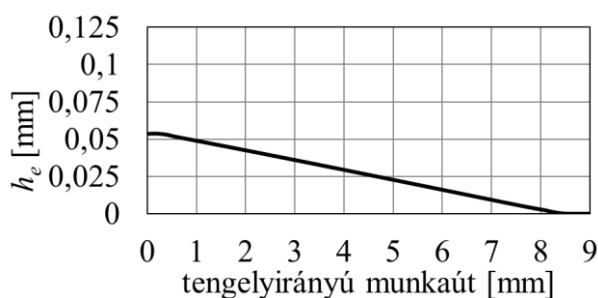
A Befejező szakasz vizsgálata a 4.2.2. fejezetben közölt összefüggésekkel történik a 2.2. fejezetben megadott vizsgálati tartományon. A forgácsszélesség változása a szerszám felületgeneráló pontjának tengelyirányú elmozdulás függvényében a 4.16. ábrán látható. A csökkenésben két töréspont figyelhető meg. Az első akkor következik be, amikor a forgácsolt felület legnagyobb átmérője kisebbé válik, mint a megmunkálandó felület átmérője. Ezért a forgácsszélesség csökkenése is intenzívebbé válik. A második töréspontot az jelenti, amikor a szerszám eléri a munkadarab véglapját. Ekkor még egy körülfordulás szükséges a teljes megmunkált felület elkészültéhez, de itt már kisebb mértékű a forgácsszélesség csökkenése.

A forgácskeresztmetszet változása az axiális elmozdulás függvényében (4.16. ábra) a 4.2.2. fejezetben látható módon itt is három intervallumra bontható a kilépés. Az 1. a Befejező szakasz közel 10%-ig tart, ahol egyre nagyobb mértékű csökkenés figyelhető meg. Ennek oka, hogy a 4.8. ábrán látható módon a forgácsoló él azon része kezd kilépni a fogásból, amelyik a legnagyobb anyagvastagságot távolítja el. Ezt követően a csökkenés közel lineáris a Befejező szakasz közel 60%-ig, mivel ekkor a forgácsszélesség lineáris változása fogja befolyásolni A_c értékét. Végezetül a fogásból való kilépésig a görbe ellaposodását láthatjuk, mivel ekkor már az anyagvastagság folyamatosan csökken a 4.9. ábra szerint.

Az ekvivalens forgácsvastagságot vizsgálva a 4.17. ábra alapján látszik az előzőekben bemutatott két töréspont. A szerszámél munkadarabból való kilépésekor egy lokális maximum eléréséig nő, majd csökken a h_e értéke. Ennek oka, hogy a 4.9. ábrán látható módon a legnagyobb élre merőleges anyagvastagság eléréséig az ekvivalens forgácsvastagságtól kisebb anyagréteget leválasztó élszakasz lép ki a fogásból, ezért az átlagos érték növekedése figyelhető meg. Ezt követően az egyre csökkenő (adott élpontra merőleges) vastagság miatt az átlagos vastagság folyamatosan csökken, amíg a kilépésnél el nem éri a 0 értéket. A forgácsvastagság kezdeti növekedése, majd folyamatos csökkenése miatt a szerszámél munkadarabból való kilépése során a fajlagos forgácsolóerő változására számíthatok.



4.16. ábra. Forgácsszélesség és forgácskeresztmetszet változása a Befejező szakasz során



4.17. ábra. Az ekvivalens forgácsvastagság változása a Befejező szakasz során

4.4 A forgácsjellemzők vizsgálati eredményeinek összefoglalása

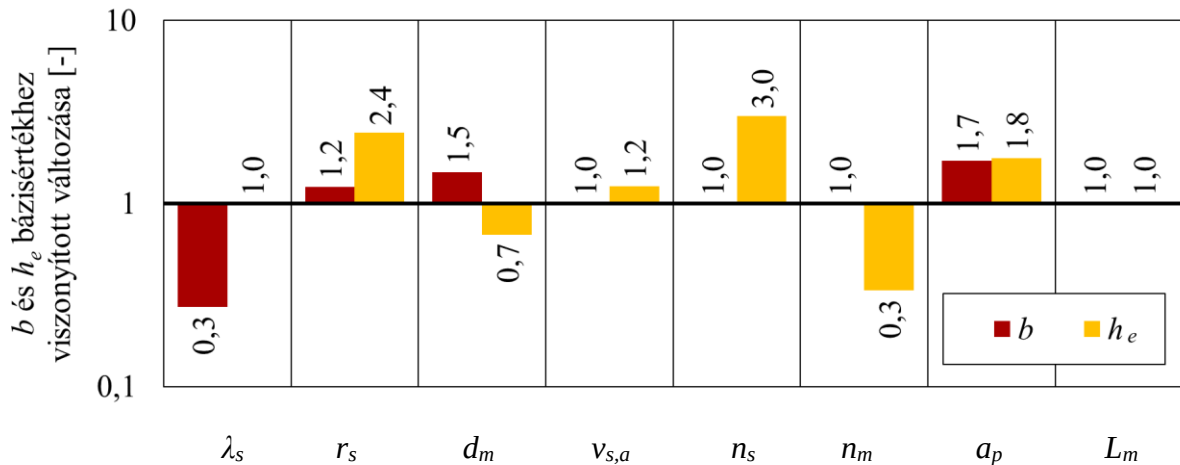
A rotációs esztergálás forgácsleválasztásának folyamatát vizsgálva három, egymástól jól elkülöníthető forgácsolási szakaszt értelmeztem: Bekezdési, Állandósult és Befejező szakasz. A forgácsolt felület alapsíkbeli egyenletének segítségével meghatároztam a forgács szélesség és az ekvivalens forgácsvastagság összefüggéseit a három szakaszra. Egyszerűsíttem a 4.7. és 4.9. egyenlet összefüggéseit az $\omega_m r_m = v_c$, $\omega_s r_s = v_{f,t}$ és $\omega_m = 2\pi n_m$ behelyettesítéseket, valamint a 4.23. egyenletben látható kiemelést elvégezve. Így az állandósult szakaszban a forgács szélesség a 4.24. egyenlettel, az ekvivalens forgácsvastagság a 4.25. egyenlettel számolható.

$$\Phi = \arctan \sqrt{\frac{a_p(a_p + 2r_m)(a_p + 2r_m + 2r_s)(2r_s - a_p)}{2r_m^2 + 2r_m(a_p + r_s) + a_p^2}} \quad (4.23)$$

$$b = \frac{\Phi}{2\pi n_m} \left[\frac{(\Phi v_c a_w)^2}{6r_s^2(v_{s,a} + v_{f,t} \operatorname{ctg} \lambda_s + v_c \operatorname{ctg} \lambda_s)} + (v_{s,a} + v_{f,t} \operatorname{ctg} \lambda_s + v_c \operatorname{ctg} \lambda_s) \right] \quad (4.24)$$

$$h_e = \frac{12\pi a_p r_s^2 (v_{s,a} + v_{f,t} \operatorname{ctg} \lambda_s)(v_{s,a} + v_{f,t} \operatorname{ctg} \lambda_s + v_c \operatorname{ctg} \lambda_s)}{\Phi \left[(\Phi v_c a_w)^2 + 6r_s^2 (v_{s,a} + v_{f,t} \operatorname{ctg} \lambda_s + v_c \operatorname{ctg} \lambda_s)^2 \right]} \quad (4.25)$$

Az egyenletek segítségével megvizsgáltam a geometriai és kinematikai jellemzők változásának hatását a forgács geometriai mérőszámaira. A 4.18. ábrán összefoglaltam b és h_e értékének változását az egyes jellemzők háromszoros változása esetén.



4.18. ábra. A rotációs esztergálást leíró paraméterek háromszoros értékének hatása a forgácsvastagság (b) és az ekvivalens forgácsvastagság (h_e) elméleti értékeire

5 A FORGÁCSLEVÁLASZTÁS HATÉKONYSÁGA

Az egyes megmunkáló eljárások forgácsleválasztási folyamatát a hatékonyság szempontjából is vizsgálják egyrészt a kiváltott eljárásokkal való összehasonlításhoz, valamint az alkalmazási terület behatárolásához. Különösen fontosak az ilyen elemzések olyan új(szerű) eljárásoknál, amelyek még nem terjedtek el a gyártási környezetben. Rotációs esztergálásnál a hatékonyságot három paraméterrel jellemzem: a gépi főidő (t_f), felületképzési sebesség (A_m vagy SR), anyagleválasztási ráta (Q_m vagy MRR). Meghatározom a három jellemző számításának módját és megvizsgálom az eljárást leíró paraméterek hatását.

5.1 A forgácsolási szakaszok összefüggései

A vizsgálandó jellemzők számítási módjainak elemzésével kezdem az összefüggések meghatározását. A felületképzés sebessége megmutatja a munkadarabon egységnyi idő alatt megmunkált felület nagyságát. Külső hengeres felület forgácsolásakor a megmunkált felület átmérőjéből és hosszából adódó palástfelület felszínének és a főidőnek a hányadosával számolhatjuk ki (5.1. egyenlet). Az anyagleválasztási ráta a munkadarabról egységnyi idő alatt leválasztott anyagtérfogatot mutatja meg. Külső hengeres felület megmunkálásánál a kiindulási és az elkészült felületek által határolt üreges henger és a gépi főidő hányadosa adja meg az 5.2. egyenlet szerint.

$$A_m = \frac{d_m \pi L_m}{t_f} \quad (5.1)$$

$$Q_m = \frac{(D_m^2 - d_m^2) \frac{\pi}{4} L_m}{t_f} \quad (5.2)$$

A gépi főidő (t_f) a szerszám fogásban töltött idejét jelenti, az egyes eljárások különböző gazdaságossági elemzéseinél általában ezt az időtényezőt vizsgálják [133]. Az 5.3. egyenletből látható, hogy a megmunkáláshoz szükséges főidőt az előtolás és a munkadarabfordulatszám mellett az előtolás irányába eső munkaút és a fogások száma határozza meg. Rotációs esztergálásnál $i = 1$ az eljárás befejező megmunkálás jellege miatt, a felületképző pont fogásban töltött idő alatti elmozdulásába az állandó keresztmetszetű anyagleválasztás mellett a bekezdési és a befejező forgácsolási szakasz tengelyirányú munkaútját is számításba veszem (5.4. egyenlet).

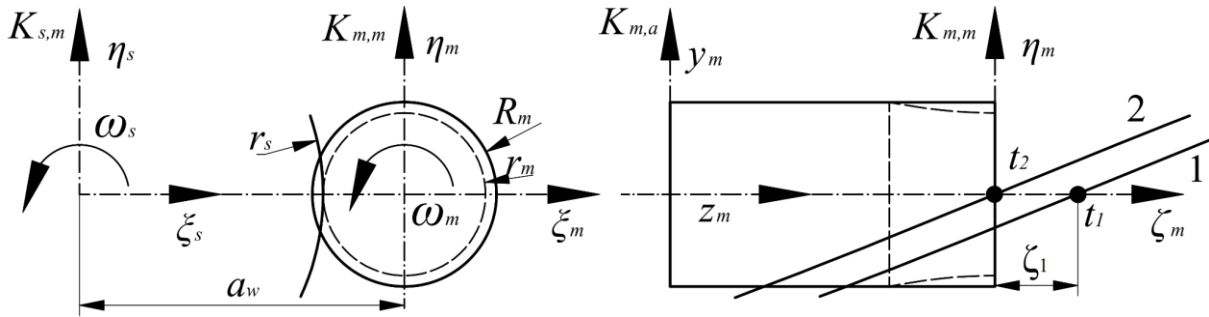
$$t_f = \frac{L}{n_m f_a} i \quad (5.3)$$

$$L = L_k + L_{all} + L_f \quad (5.4)$$

Az összefüggések számításához bemeneti adatként rendelkezésre kell állni egyes geometriai paramétereknek: a szerszám tengelyirányú munkaútja (L) a munkadarab megmunkálandó felületének hossza (L_m), a munkadarab megmunkálandó (D_m) és megmunkált (d_m) felületének átmérője. Emellett meghatározom a forgácsolási szakaszok tengelyirányú munkaútját, valamint a szerszám által megtett szögelfordulást. A kidolgozás során a 4.1. fejezetben bemutatott forgácsleválasztási szakaszokat külön tárgyalom.

5.1.1 A Bekezdési szakasz kezdete

A Bekezdési szakasz idejének meghatározásához a forgácsoló él munkadarab mozgó koordináta-rendszerében értelmezett 3.12. egyenletét használom. Az egyenletben szereplő munkadarab szögsebességet (ω_m) nullának veszem, mivel a Bekezdési szakasz idejét a szerszám forgó és tengelyirányú mozgása befolyásolja csak a kinematikai paraméterek közül. A meghatározás első lépése a peremfeltételek meghatározása. Ehhez a 3.2. ábrán bemutatott modell megfelelő nézetei szükségesek, melyek az 5.1. ábrán láthatóak.



5.1. ábra. A Bekezdési szakasz jellegzetes élhelyzetei

Az 5.1. ábrán a $K_{m,m}$ koordináta-rendszer egy különleges helyzetben lett meghatározva. Ennél a munkadarab véglapja úgy lett definiálva, hogy egybe essen a ξ_m és ζ_m tengelyek által meghatározott síkkal. Ebben az esetben a munkadarab és a szerszám találkozási pontjára három peremfeltételt (5.5. egyenlet) lehet meghatározni arra az esetre, amikor a szerszám forgása közben az 1. élhelyzetben éppen eléri a munkadarab tengelyvégét (Bekezdési szakasz kezdete). Ebben a pontban a koordináta-rendszer helyzete miatt a vektoregyenlet ζ_m irányú tagjának zérusnak kell lennie (A_1 feltétel). A matematikai leírásból következik, hogy ezzel a feltétellel két érintkezési pont is meghatározható az η_m irányú összetevő előjelének függvényében. A modell szerint a negatív irányú összetevő veendő figyelembe (B_1 feltétel). A harmadik feltétel, hogy az él görbájének érintenie kell a munkadarab kontúrját a $[\xi_m, \zeta_m]$ síkban, vagyis az érintési pont ξ_m és ζ_m koordinátáinak a négyzetösszege egyenlő a munkadarab megmunkálandó felületének sugarának (R_m) négyzetével (C_1 feltétel).

$$A_1: \zeta = 0 \quad , \quad B_1: \eta < 0 \quad , \quad C_1: \xi^2 + \eta^2 = R_m^2 \quad (5.5)$$

Az A_1 feltételből a „ p ” paraméterre adódik összefüggést 5.6. egyenletben felírt módon.

$$0 = \frac{r_s}{tg\lambda_s} p - v_{s,a} t \quad \Rightarrow \quad p = \frac{v_{s,a} tg\lambda_s}{r_s} t \quad (5.6)$$

A B_I feltétel alapján az η_m koordináta negatív. Felírva látható, hogy a szorzat akkor lehet negatív, ha a szinusz szögfüggvényben szereplő kifejezés negatív (5.7. egyenlet).

$$\begin{aligned} \eta_m < 0 &\Rightarrow r_s [\sin(p + \omega_s t)] < 0 \\ -\pi < \omega_s t + p < \pi, \quad r_s > 0 &\Rightarrow \omega_s t + p < 0 \end{aligned} \quad (5.7)$$

A végeredményül kapott kifejezésbe behelyettesítve az 5.6. egyenletet látható, hogy az η_m koordináta csak akkor lesz negatív, ha a végeredményül kapott idő (t) negatív (5.8. egyenlet). Ennek oka, hogy a $t_2 = 0$ időpillanat a Bekezdési szakasz végére került felvételre a $[\xi_m, \zeta_m]$ síknak a munkadarab véglapjára való rögzítésével, így a szerszám ehhez a helyzethez képest negatív irányú forgást kell végezzen ahhoz, hogy az 1. élhelyzetbe kerüljön.

$$\omega_s t + \frac{v_{s,a} \operatorname{tg} \lambda_s}{r_s} t = t \left(\omega_s + \frac{v_{s,a} \operatorname{tg} \lambda_s}{r_s} \right) < 0 \Rightarrow t < 0 \quad (5.8)$$

A C_1 feltételbe behelyettesítve a 3.12. egyenlet megfelelő paramétereit az 5.9. egyenletben látható eredmény adódik. Elvégezve a $\sin^2(\alpha) + \cos^2(\alpha) = 1$ egyszerűsítést, felírható az 5.10. egyenlet a munkadarab megmunkálendő felületének sugarára.

$$\begin{aligned} R_m^2 = \xi^2 + \eta^2 &= (r_s \cos(\omega_s t + p) - a_w)^2 + (r_s \sin(\omega_s t + p))^2 = \\ &= r_s^2 \cos^2(\omega_s t + p) - 2a_w r_s \cos(\omega_s t + p) + a_w^2 + r_s^2 \sin^2(\omega_s t + p) \end{aligned} \quad (5.9)$$

$$R_m^2 = r_s^2 - 2a_w r_s \cos(\omega_s t + p) + a_w^2 \quad (5.10)$$

Kifejezem a Bekezdési szakasz kezdetéhez tartozó időt az 5.10. egyenlet matematikai átalakításával, valamint az 5.6. egyenletet behelyettesítve. Az 5.8. egyenlet alapján az eredmény negatív lesz, kielégítve az 5.5. egyenlet feltételét. Az 1. élhelyzethez tartozó idő az 5.11. egyenlet szerint számítandó.

$$t_1 = -\frac{r_s}{r_s \omega_s + v_{s,a} \operatorname{tg} \lambda_s} \arccos \left(\frac{r_s^2 + a_w^2 - R_m^2}{2a_w r_s} \right) \quad (5.11)$$

A Bekezdési szakasz időtartamát meghatározza a 2. ábrán látható két élhelyzethez tartozó idő az 5.12. egyenlet szerint.

$$t_{be} = t_2 - t_1 = 0 - t_1 = \frac{1}{r_s \omega_s + v_{s,a} \operatorname{tg} \lambda_s} \arccos \left(\frac{r_s^2 + a_w^2 - R_m^2}{2a_w r_s} \right) \quad (5.12)$$

A Bekezdési szakaszhoz tartozó forgácsolásban eltöltött idő ismeretében meghatározom a szerszám megmunkált felületet képző pontjának axiális irányú elmozdulását (vagyis a Bekezdési szakasz minimális értékét), valamint az ehhez tartozó elfordulási szöget. Előbbi meghatározásához az él 5.1. ábrán látható 1. helyzetének azon pontjának matematikai leírására van szükség, amelyik a szerszám alapsíkban van. Ehhez három feltételt kell

definiálni az 5.1. ábra alapján a 3.12. egyenlethez. A ξ_m iránybeli összetevőnek meg kell egyeznie a munkadarab megmunkált felületének r_m sugarával (A_2 feltétel). Másrészt az η_m komponensnek zérusnak kell lennie, mivel a meghatározott pont a $[\xi_m, \zeta_m]$ síkban van (B_2 feltétel). Harmadrészt a „ t ” paraméter az 5.6. egyenletben lévő t_1 értékével egyenlő (C_2 feltétel). A három feltétel matematikai felírása az 5.13. egyenletben látható.

$$A_2: \xi_m = -r_m \quad , \quad B_2: \eta = 0 \quad , \quad C_2: t = t_1 \quad (5.13)$$

Az A_2 és a B_2 feltétel alapján a „ p ” paraméter értékét határozom meg az 5.14. egyenlet szerint. Mindkét esetben ugyanaz az eredmény adódik.

$$\left. \begin{array}{l} A_2: r_s \cos(\omega_s t + p) - (r_s + r_m) = -r_m \Rightarrow \cos(\omega_s t + p) = 1 \\ B_2: r_s \sin(\omega_s t + p) = 0 \Rightarrow \sin(\omega_s t + p) = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow p = -\omega_s t \quad (5.14)$$

Az 1. élhelyzetnek ζ_m irányú távolsága a 3.12. egyenlet alapján írható föl. Az 5.14. egyenlettel meghatározott paraméter behelyettesítésével az 5.15. egyenlet adódik.

$$\zeta_1 = pr_s \operatorname{ctg} \lambda_s - v_t t = -t_1 (v_t \operatorname{ctg} \lambda_s + v_{s,a}) \quad (5.15)$$

A Bevezetői szakasz axiális irányú hosszára az összefüggés a (korábban az 5.11. egyenletben meghatározott) t_1 érték 5.15. egyenletbe helyettesítésével adódik (C_2 feltétel). Az egyszerűsítést követően a kifejezés az 5.16. egyenletben látható.

$$\zeta_1 = r_s \operatorname{ctg} \lambda_s \arccos \left(\frac{r_s^2 + a_w^2 - R_m^2}{2a_w r_s} \right) \quad (5.16)$$

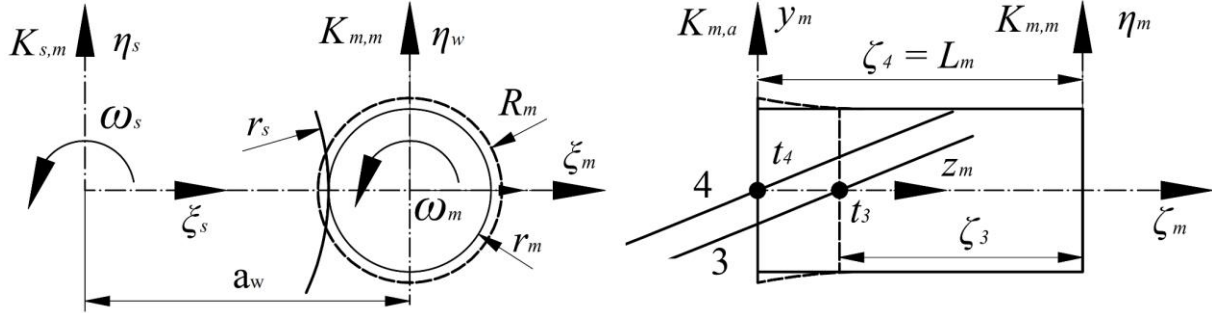
A szerszám Bevezetői szakaszhoz tartozó elfordulási szöge meghatározható az idő és a szerszám szögsebességének ismeretében. Ebben az esetben az 5.12. egyenletben meghatározott eredmény beírásával az 5.17. egyenletben látható alak adódik.

$$\vartheta_{be} = t_{be} \omega_s = \frac{\omega_s}{r_s \omega_s + v_{s,a} \operatorname{tg} \lambda_s} \arccos \left(\frac{r_s^2 + a_w^2 - R_m^2}{2a_w r_s} \right) \quad (5.17)$$

5.1.2 A munkadarabból való kilépés kezdete

A megmunkálás hatékonyságát jellemző paraméterek meghatározásához a Befejező szakasz során a 3.12. egyenletet használom, ahol a munkadarab szögsebességet (ω_m) nullának veszem, mivel a jellemző paramétereket a szerszám forgó és tengelyirányú mozgása befolyásolja csak a kinematikai paraméterek közül. Az 5.2. ábrán látható nézetek szükségesek a peremfeltételek meghatározásához a 3.2. ábrán bemutatott modellből. Az ábrán látható koordináta-rendszerek az 5.1. fejezetben leírt módon definiáltak. A munkadarab megmunkálás kezdeti véglapja egybeesik a ξ_m és ζ_m tengelyek által meghatározott síkkal, a

munkadarab második véglap pedig a $[x_m, y_m]$ síkban található. Az ábrán a szerszám két helyzete látható: a 3. élhelyzet az utolsó időpillanat, amikor még a teljes forgácsszélesség és az Állandósult szakaszt jellemző keresztmetszet lesz. A 4. élhelyzetben lép ki teljesen a fogásból a szerszám éle.



5.2. ábra. A Bekezdési szakasz jellegzetes élhelyzetei

A 3. élhelyzet megadásához (Állandósult szakasz vége) a munkadarab és a szerszámél találkozási pontjára három peremfeltételt szükséges meghatározni (5.18. egyenlet). Ebben a pontban a koordináta-rendszer helyzete miatt a vektoregyenlet ζ_m irányú tagjának a munkadarab hosszával ($-L_m$, a tengelyirányt is figyelembe véve) egyezik meg (A_3 feltétel). Ez a feltétel a 4.1. fejezethez hasonlóan két érintkezési pontot jelent az η_m irányú összetevő előjelének függvényében. A modell irányítottasága miatt a negatív irányú összetevő veendő figyelembe (B_3 feltétel). A harmadik feltétel, hogy az él görbájének érintenie kell a munkadarab kontúrját az $[x_m, y_m]$ síkban, vagyis a megmunkálandó felület sugarának (R_m) négyzetével egyezik meg az érintési pont ξ_m és η_m koordinátáinak a négyzeteinek összege (C_3 feltétel). Az A_1 feltételből a 3.12. egyenlet ζ_m koordinátájára adódik az 5.19. egyenlet.

$$A_3: \zeta = -L_m \quad , \quad B_3: \eta < 0 \quad , \quad C_3: \xi^2 + \eta^2 = R_m^2 \quad (5.18)$$

$$-L_m = \frac{r_s}{tg \lambda_s} p - v_{s,a} t \quad \Rightarrow \quad p = \frac{(v_{s,a} t - L_m) tg \lambda_s}{r_s} \quad (5.19)$$

A B_3 feltétel alapján az η_m koordináta negatív. A 3.12. egyenlet megfelelő tagját kifejezve következik, hogy a szögfüggvényben szereplő kifejezés negatív (5.20. egyenlet).

$$\eta < 0 \quad \Rightarrow \quad r_s [\sin(p + \omega_s t)] < 0 \quad (5.20)$$

$$-\pi < \omega_s t + p < \pi, \quad r_s > 0 \quad \Rightarrow \quad \omega_s t + p < 0$$

A végeredményül kapott kifejezésbe behelyettesítve az 5.19. egyenletet látható, hogy az η_m koordináta csak akkor lesz negatív, ha a végeredményül kapott idő (t) teljesíti az 5.21. egyenlet feltételét.

$$\omega_s t + \frac{(v_{s,a} t - L_m) tg \lambda_s}{r_s} < 0 \quad \Rightarrow \quad t_3 < \frac{L_m}{r_s \omega_s ctg \lambda_s + v_{s,a}} \quad (5.21)$$

Ennek oka, hogy a t_4 időpillanat a Befejező szakasz végére került felvételre az $[x_m, y_m]$ síknak a munkadarab véglapjára való rögzítésével. A t_4 idő a munkadarab teljes hosszának megmunkálását jelenti, amelynek a számítása az 5.21. egyenlet jobb oldalán látható. A szerszámnak ettől kevesebb ideig kell forognia ahhoz, hogy a 3. élhelyzetbe kerüljön. A C_3 feltételből következik az 5.10. egyenlettel megegyező alakú 5.22. egyenlet, melyet megoldva (az 5.19. és az 5.21. egyenletek feltételeit figyelembe véve) adódik az összefüggés a Befejező szakasz kezdetéhez tartozó időpillanathoz (5.23. egyenlet).

$$R_m^2 = r_s^2 - 2a_w r_s \cos(\omega_s t + p) + a_w^2 \quad (5.22)$$

$$t_3 = \frac{1}{r_s \omega_s + v_{s,a} \operatorname{tg} \lambda_s} \left[L_m \operatorname{tg} \lambda_s - r_s \arccos \left(\frac{r_s^2 + a_w^2 - R_m^2}{2a_w r_s} \right) \right] \quad (5.23)$$

Az 5.2. ábrán látható 3. élhelyzet véglaptól számított axiális távolságának meghatározásához 3 peremfeltételnek kell teljesülnie (5.24. egyenlet). Az A_4 és a B_4 feltételekből adódik az 5.25. egyenletben látható összefüggés.

$$A_4: \xi_m = -r_m \quad , \quad B_4: \eta = 0 \quad , \quad C_4: t = t_3 \quad (5.24)$$

$$\omega_s t + p = 0 \quad (5.25)$$

Az 5.23. egyenletet behelyettesítve az 5.25. egyenletbe megkapom a ζ_m irányú összetevőjét a 3. élhelyzet alapsíkot metsző pontjának (5.26. egyenlet). Végezetül a szerszám szögelfordulásának meghatározásához, hogy a 3. élhelyzetbe kerüljön, a t_3 idő szerszámszögsebességgel való szorzatát kell képezni az 5.27. egyenlet szerint.

$$\zeta_3 = r_s \operatorname{ctg} \lambda_s p - v_{s,a} t = -L_m + r_s \operatorname{ctg} \lambda_s \arccos \left(\frac{r_s^2 + a_w^2 - R_m^2}{2a_w r_s} \right) \quad (5.26)$$

$$\vartheta_3 = t_3 \omega_s = \frac{\omega_s}{r_s \omega_s + v_{s,a} \operatorname{tg} \lambda_s} \left[L_m \tan \lambda_s - r_s \arccos \left(\frac{r_s^2 + a_w^2 - R_m^2}{2a_w r_s} \right) \right] \quad (5.27)$$

5.1.3 A szerszám munkautja, szögelfordulása és a gépi főidő

Az 5.1 és 5.1.2 fejezetekben meghatároztam a forgácsleválasztás jellegzetes szakaszainak kezdeti- és véghelyzeteihez tartozó axiális távolságokat, időparamétereket és szerszám-szögelfordulás értékeket.

Az 5.1. ábra 1. és 2. élhelyzeteinek paramétereiből számítható a Bekezdési szakasz, az 5.2. ábra 3. és 4. élhelyzeteiből a Befejező szakasz keresett értékei. A Bekezdési és a Befejező szakasz paraméterei a szimmetria miatt megegyeznek (ahogy a korábbi fejezetek levezetéséből is látszik).

Ezekre az esetekre a tengelyirányú hossz az 5.28. egyenlet, az időtartam az 5.30. egyenlet, a szerszám szögelfordulását az 5.29. egyenlet szerint számítandó.

$$L_k = L_f = r_s \operatorname{ctg} \lambda_s \arccos \left(\frac{r_s^2 + a_w^2 - R_m^2}{2a_w r_s} \right) + f_a \quad (5.28)$$

$$\vartheta_k = \vartheta_f = \frac{\omega_s}{r_s \omega_s + v_{s,a} \operatorname{tg} \lambda_s} \left[r_s \arccos \left(\frac{r_s^2 + a_w^2 - R_m^2}{2a_w r_s} \right) + f_a \operatorname{tg} \lambda_s \right] \quad (5.29)$$

$$t_k = t_{bf} = \frac{1}{r_s \omega_s + v_{s,a} \operatorname{tg} \lambda_s} \left[r_s \arccos \left(\frac{r_s^2 + a_w^2 - R_m^2}{2a_w r_s} \right) + f_a \operatorname{tg} \lambda_s \right] \quad (5.30)$$

Az 5.2. ábra 3. élhelyzetéhez és az 5.1. ábra 2. élhelyzetéhez tartozó meghatározott változók segítségével az Állandósult szakasz axiális hossza az 5.31. egyenlet, időtartama az 5.33. egyenlet, a szerszám szögelfordulása az 5.32. egyenlet szerint számítható.

$$L_{\text{áll}} = L_m - r_s \operatorname{ctg} \lambda_s \arccos \left(\frac{r_s^2 + a_w^2 - R_m^2}{2a_w r_s} \right) - f_a \quad (5.31)$$

$$\vartheta_{\text{áll}} = \frac{\omega_s}{r_s \omega_s \operatorname{ctg} \lambda_s + v_{s,a}} \left[L_m - r_s \operatorname{ctg} \lambda_s \arccos \left(\frac{r_s^2 + a_w^2 - R_m^2}{2a_w r_s} \right) - f_a \right] \quad (5.32)$$

$$t_{\text{áll}} = \frac{1}{r_s \omega_s \operatorname{ctg} \lambda_s + v_{s,a}} \left[L_m - r_s \operatorname{ctg} \lambda_s \arccos \left(\frac{r_s^2 + a_w^2 - R_m^2}{2a_w r_s} \right) - f_a \right] \quad (5.33)$$

5.2 A gépi főidő, a felületképzés sebessége és az anyagleválasztási ráta

A felületképzési sebesség (A_m) és az anyagleválasztási ráta (Q_m) számításához szükséges a megmunkálás gépi főidejének meghatározása is. Fogásvétel után a megmunkálandó és a megmunkált felület átmérője között a forgácskeresztmetszet folyamatosan nő a Bekezdési, és csökken a Befejező szakaszban. Mivel a szerszám már ekkor is munkaelőtolással forog, ezeket is bele kell számítani a gépi főidőbe (5.34. egyenlet). Hagyományos esztergálásnál ezek a szakaszok olyan kicsik a megmunkált felület hosszához képest, hogy sokszor teljesen eltekinthetnek tőlük.

$$t_f = t_k + t_{\text{áll}} + t_{bf} \quad (5.34)$$

Az 5.1.3. fejezetben meghatározott időtényezőket behelyettesítve az 5.34. egyenletbe kapom a rotációs esztergálással végzett megmunkálás gépi főidejének számítóképletét a geometriai és a kinematikai adatok függvényében az 5.35. egyenletben látható formában.

$$t_f = \frac{L_m \operatorname{tg} \lambda_s + r_s \arccos \left(\frac{r_s^2 + a_w^2 - R_m^2}{2a_w r_s} \right) + f_a \operatorname{tg} \lambda_s}{r_s \omega_s + v_{s,a} \operatorname{tg} \lambda_s} \quad (5.35)$$

A gépi főidő ismeretében a keresett gazdaságosságot jellemző paraméterek meghatározása következik. Az 5.35. egyenletet az 5.1. egyenletbe helyettesítve a felületképzési sebesség számítható az 5.36. egyenlet szerint. Az anyagleválasztási ráta 5.37. egyenlet szerint került meghatározásra.

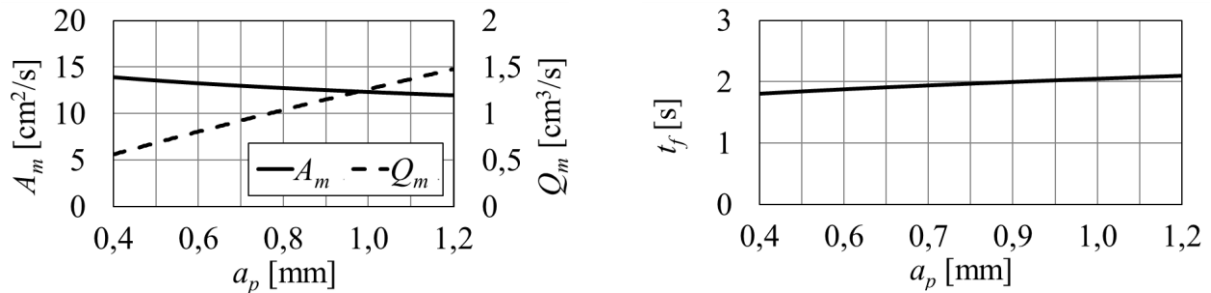
$$A_m = \frac{d_m \pi L_m}{t_f} = \frac{2\pi r_m L_m (r_s \omega_s + v_{s,a} \operatorname{tg} \lambda_s)}{L_m \operatorname{tg} \lambda_s + r_s \arccos \left(\frac{r_s^2 + a_w^2 - R_m^2}{2a_w r_s} \right) + f_a \operatorname{tg} \lambda_s} \quad (5.36)$$

$$Q_m = \frac{R_w^2 - r_w^2}{t_f} \pi L_m = \frac{(R_m^2 - r_m^2) \pi L_m (r_s \omega_s + v_{s,a} \operatorname{tg} \lambda_s)}{L_m \operatorname{tg} \lambda_s + r_s \arccos \left(\frac{r_s^2 + a_w^2 - R_m^2}{2a_w r_s} \right) + f_a \operatorname{tg} \lambda_s} \quad (5.37)$$

5.3 A rotációs esztergálást befolyásoló paraméterek hatása

Megvizsgálom, hogy a technológiai paraméterek és a forgácsleválasztást befolyásoló adatok változása hogyan hatnak a felületképzési sebességre és az anyagleválasztási rátára. A számítási eredmények grafikonon kerültek ábrázolásra, ezután történt a kiértékelésük.

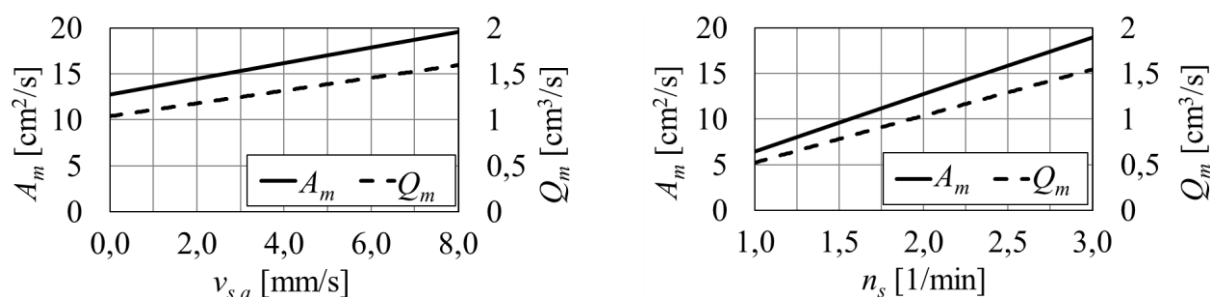
A technológiai paraméterek közül a fogásmélység változásának hatását az 5.3. ábra mutatja. Az anyagleválasztási ráta a vártnak megfelelően növekszik a fogásmélységgel: utóbbi háromszoros növekedése a ráta közel 2,63-szoros növekedését fogja okozni.



5.3. ábra. A fogásmélység (a_p) hatása

Az 5.3. ábrán megfigyelhető, hogy az a_p háromszorosára növelésével a felületképzési sebesség csökken (14 %-kal), bár a fogásmélységnek sem a megmunkált felület nagyságára, sem az előtolásra nincs közvetlen hatása. Azonban a munkadarabon lévő nagyobb anyagréteg miatt hamarabb lép fogásba a szerszám. A leválasztandó ráhagyásalakzat növekedésével nőni fog a szerszám Bekezdési ideje is, vagyis az az út, amelyet a megmunkálandó és a megmunkált felület átmérője között tesz meg. A hatás az 5.3. ábrán látható, amely bemutatja az 5.35. egyenlet alapján, a fogásmélység változásának függvényében a megmunkálási időt. Látható, hogy a fogásmélység háromszorosára növelése 16%-kal növeli meg a megmunkálás gépi főidejét. Ez okozza a felületképzési sebesség arányos csökkenését.

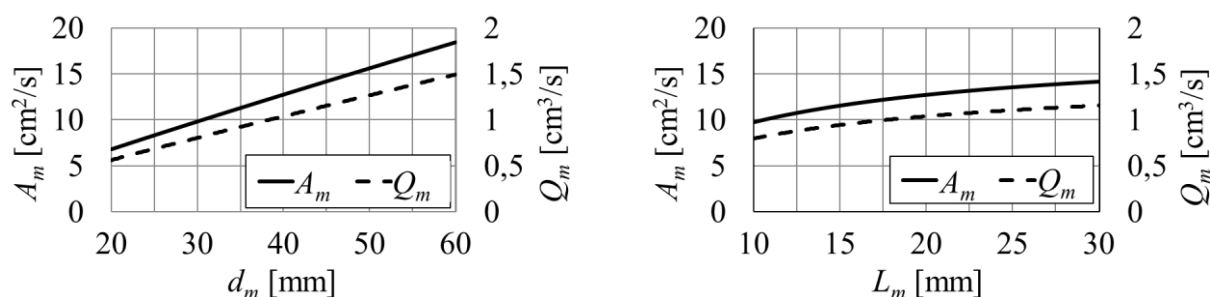
A kiegészítő axiális előtolás hatását mutatja az 5.4. ábra. Ennél a paraméternél lineáris növelő hatás figyelhető meg. A kiegészítő axiális előtolás közvetlenül növeli az eredő előtolást, ezért csökkenti a megmunkálás főidejét. A számított értékekből megállapítom, hogy $v_{s,a}$ háromszorosára való növelése 23%-kal növeli meg a felületképzési sebességet és az anyagleválasztási rátát is.



5.4. ábra. A kiegészítő axiális előtolás ($v_{s,a}$) és a szerszámfordulatszám (n_s) hatása

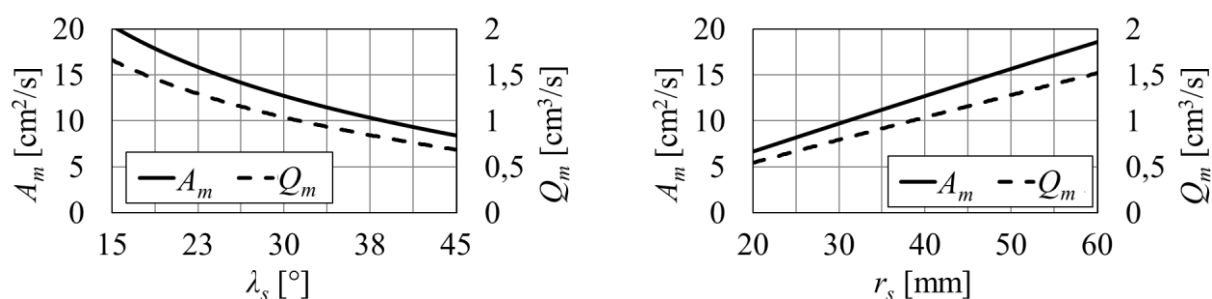
A technológiai paraméterek közül a fentiekén kívül még a szerszám fordulatszáma gyakorol hatást a hatékonyság paramétereire (5.4. ábra). A szerszám fordulatszámának növelése a körelőtolásból származó előtoló sebességet növeli, így a megmunkálás idejét csökkenti. Emiatt a felületképzési sebességre és az anyagleválasztási rátára is növelő hatással van: a fordulatszám háromszorosára növelése a vizsgált jellemzőket 2,9-szeresére növeli.

A vizsgálandó geometriai paraméterek: munkadarab megmunkált felületének átmérője, megmunkált hossz, terelőszög, szerszámsugár. Ezekből először a munkadarab geometriai jellemzői közül a megmunkált felület átmérőjét vizsgálom, melynek a hatékonyság paramétereire gyakorolt hatását mutatja az 5.5. ábra.



5.5. ábra. A munkadarab átmérő (d_m) és a megmunkált hossz (L_m) hatása

A megmunkált átmérő változásával növekszik az a palástfelület, melyen a szerszám végighalad. Mivel a többi paraméter változatlan, így növelő hatást fog kifejteni: háromszor nagyobb munkadarab átmérő esetén közel 2,7-szeresére növeli a vizsgált paraméterek értékét. A megmunkált hossz változásakor látható (5.5. ábra), hogy kisebb értékek esetén nagyobb növekedést okoz ugyanakkora hosszváltozás, mint hosszabb munkadarabok esetén. Ennek magyarázata a Bekezdési és Befejező szakasz munkadarabhosszhoz viszonyított arányában keresendő. Az 5.28. egyenlet alapján a számítást elvégezve 7,146 mm adódik a Bekezdési és Befejező hosszokra a bázisértékek esetén. A megmunkált távolság 10 mm és 30 mm között változik. A minimum értéknél a megmunkált hossz 71 %-a, a maximumnál 23 %-a lesz a Bekezdési és a Befejező szakasz. Így belátható, hogy a megmunkálandó hossz nagyobb értékeinél az egységnyi növekedés kisebb intenzitású változást okoz. A vizsgált tartományról megállapítható, hogy háromszor nagyobb hosszúságú munkadarab megmunkálása esetén 44%-kal növeli meg a hatékonyság vizsgált jellemzőit.



5.6. ábra. A terelőszög (λ_s) és a szerszámsugár (r_s) hatása

A szerszámgeometriát jellemző paraméterek közül az első paraméter a vizsgálatban a szerszám terelőszöge. Az 5.6. ábrából megfigyelhető, hogy a felületképzési sebességre és az anyagleválasztási rátára is csökkentő hatása van a terelőszög növelésének: háromszorosára való növelése esetén 2,4-ed részére csökkennek a vizsgált paraméterek. Ennek oka, hogy a többi paraméter változatlanul hagyása mellett a szögértéket növelve a megmunkálási idő növekedni fog, hiszen a szerszámnak nagyobb mértékű elfordulásra van szüksége ugyanazon axiális hossz megmunkálására.

A vizsgálatokat a szerszámsugár-változás hatásának elemzésével zártam (5.6. ábra). Amennyiben a szerszám fordulatszámát változatlanul hagyjuk, úgy nagyobb sugarú szerszám nagyobb kerületi sebességet, tehát rövidebb megmunkálási időt eredményez. Ezzel összhangban megállapítom, hogy a sugár háromszorosára való növelése 2,8-szeresítésre növeli a vizsgált paramétereket.

5.4 A hatékonyságelemzés eredményeinek összefoglalása

A felületképzési sebesség és az anyagleválasztási ráta fontos jellemzők a különböző megmunkáló eljárások összehasonlítására. Ezért megadtam a számításuk módját rotációs esztergálás esetére és megvizsgáltam a befolyásoló tényezők hatását az egyes paraméterekre. Az 5.35. – 5.37. egyenleteket egyszerűbb alakra hozom az $\omega_s r_s = v_{f,t}$ és $2r_m = d_m$ behelyettesítéseket, valamint az 5.38. egyenlet szerinti kiemelést felhasználva. Így rotációs esztergálásnál a gépi főidő az 5.39. egyenlet, a felületképzés sebessége az 5.40 egyenlet, az anyagleválasztási ráta az 5.41. egyenlet szerint számolandó.

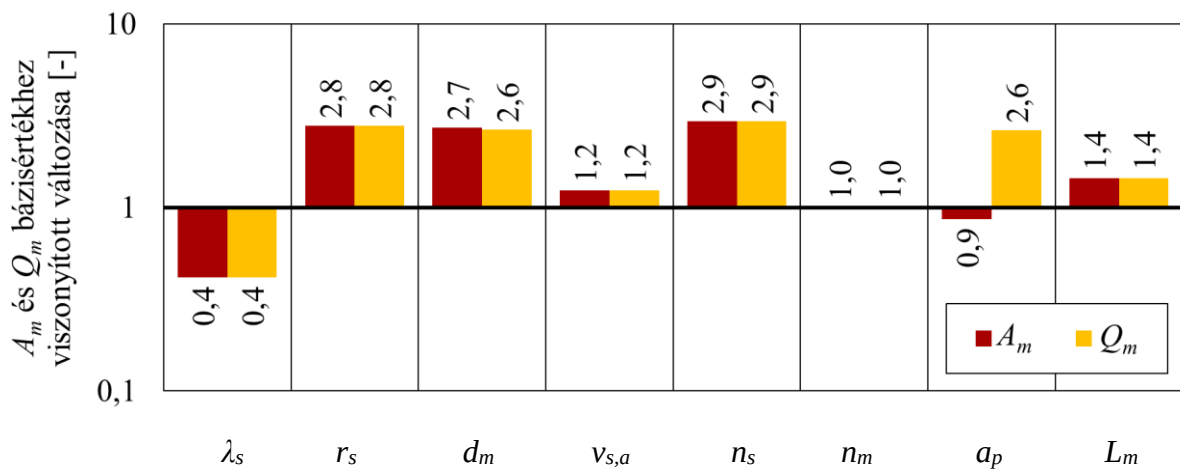
$$\arccos\left(\frac{r_s^2 + a_w^2 - R_m^2}{2a_w r_s}\right) = \theta \quad (5.38)$$

$$t_f = \frac{L_m \operatorname{tg} \lambda_s + r_s \theta + f_a \operatorname{tg} \lambda_s}{v_{f,t} + v_{s,a} \operatorname{tg} \lambda_s} \quad (5.39)$$

$$A_m = \frac{v_{f,t} + v_{s,a} \operatorname{tg} \lambda_s}{L_m \operatorname{tg} \lambda_s + r_s \theta + f_a \operatorname{tg} \lambda_s} d_m \pi L_m \quad (5.40)$$

$$Q_m = \frac{v_{f,t} + v_{s,a} \operatorname{tg} \lambda_s}{L_m \operatorname{tg} \lambda_s + r_s \theta + f_a \operatorname{tg} \lambda_s} (R_m^2 - r_m^2) \pi L_m \quad (5.41)$$

Az 5.7. ábrán az egyes jellemzők háromszoros növekedésének hatása látható. A felületképzési sebesség és az anyagleválasztási ráta növeléséhez a kiegészítő előtolást, a szerszámfordulatszámot és a szerszám sugarát növelni, a szerszám terelőszögét csökkenteni kell. A nagyobb átmérőjű és hosszúságú megmunkálandó felület növeli az anyagleválasztást. A fogásmélység növelése az anyagleválasztást növeli, a felületképzési sebességet csökkenti.



5.7. ábra. A rotációs esztergálást leíró paraméterek háromszoros értékének hatása a felületképzési sebesség (A_m) és az anyagleválasztási ráta (Q_m) elméleti értékeire

6 ROTÁCIÓS ESZTERGÁLÁSSAL MEGMUNKÁLT FELÜLET TOPOGRÁFIÁJA

Befejező precíziós megmunkáláskor többféle eljárással állíthatjuk elő az előírt érdességi követelményeknek megfelelő felületeket, alkatrészeket. Határozott élű szerszámmal dolgozó megmunkálással létrehozott felületek számos kedvező tulajdonsága (mikrokeménység, feszültségi állapot stb.) mellett nagyon fontos, hogy a működési feltételeknek megfelelő topográfia kerüljön kialakításra. Hagyományos esztergálással nagy termelékenységgel, rugalmassággal hozható létre többek között kopásálló felület, ugyanakkor több alkalmazási terület esetén (például tűgörgős csapágyak futófelületei vagy tömítésekkel érintkező felületek) nem tud megfelelni a működési követelményeknek a kialakuló periodikus topográfia miatt. A topográfia megváltoztatása más kinematikájú esztergálással vagy köszörülés alkalmazásával lehetséges. A rotációs esztergálás az előbbi változatra kínál lehetőséget.

Az érdességi mérőszámok elméleti értékei fontos információkat adnak a felület mikrogeometriai paramétereiről, segítik a várható érdesség becslését. Ezért a körelőtolással végzett esztergálásra kidolgozom az egyenetlenség-magasság és az átlagos érdesség, valamint a sodratparaméterek elméleti értékeinek számításához szükséges összefüggéseket. Elemzem a kinematikai és geometriai paraméterek hatását a felület topográfiájának mérőszámaira.

6.1 A felület érdesség egyes mérőszámainak elméleti értékei

A felületi érdesség mérőszámai közül az érdesség magasságát jellemző paraméterek geometriai értelmezéseit ábrázolja a 6.1. ábra (hegyes és rádiuszos csúcsú szerszámmal megmunkált felületek elméleti profiljai). Az elemzett hossz átlagos érdességét (R_a) a profil alapvonalra vett abszolút értékének integrálja jelenti. A legnagyobb csúcs magasságát (R_p) és a legmélyebb árok mélységét (R_v) a középvonalhoz képest határozzuk meg. A maximális érdesség (R_{max}) a legnagyobb érdességi csúcs magasságának és legmélyebb érdességi árok mélységének összege. Az ipari gyakorlatban alkalmazzák az egyenetlenségmagasságot (R_z), mely az elemzett hossz öt mérési szakaszán mért legnagyobb csúcsok és legkisebb völgyek számtani átlaga. Az elméleti érdességprofiloknál R_z és R_{max} értékei megegyeznek. A megmunkált felület érdességének meghatározásánál figyelembe kell venni, hogy az elméletileg meghatározható és a valóságban mérhető paraméterek értékei általában különböznek, azonban közöttük szoros korreláció figyelhető meg [134]. Az elméleti érdességet a forgácsoló él szerszám-alapsíkban mért elhelyezkedése (vetülete) és a felület periodikusságát megadó előtolás nagysága határozzák meg.

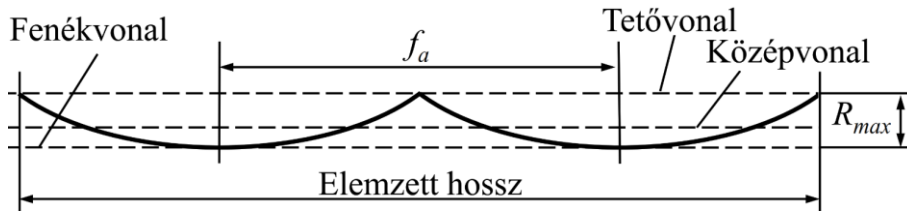


6.1. ábra. Érdességi paraméterek geometriai értelmezése hegyes és rádiuszos csúcs esetén

A felület elméleti profiljának vizsgálatát R_a és R_z számítási módjának meghatározásával kezdem. A szerszámél alapsíkbeli helyzetét a szerszámélre korábban megadott összefüggések (3.2.3 fejezet) segítségével határozom meg, melyet rotációs esztergálásnál a munkadarab megmunkált felületének átmérője, a szerszám csavarvonalú élének sugara és emelkedési szöge befolyásolja. A felület periodikusságának mértékét az eredő axiális előtolás, azaz a 3.1. egyenlet szerint a szerszám és a munkadarab fordulatszámai, a kiegészítő előtolás, a szerszám terelőszöge és a sugara adja meg.

6.1.1 Az egyenetlenség-magasság

A megmunkált felület szerszám alapsíkban értelmezett egyváltozós egyenletének meghatározása (3.2.3. fejezet) alapján felrajzolom az elméleti érdességi profilt rotációs esztergálásnál (6.2. ábra). A szerszám lassú forgómozgása, illetve a 0-tól nagyobb terelőszög miatt a forgácsoló él megmunkált felületet kialakító pontja az él mentén végighalad. Ez a felületképző pont a munkadarab egy körülfordulása alatt adott mértékű (előtolásnyi) axiális elmozdulást végez a munkadarab egy alkotóján. Ennek megfelelően a forgácsolt felület profilja (3.5. ábra) periodikusan ismétlődik a megmunkált felület létrejöttékor. Ezt a görbét mutatja a 6.2. ábra. A periodikus profil alakját a szerszám geometriai jellemzői, a periodicitását a kinematikai viszonyok szabják meg. A maximális érdesség elméleti értékét a csúcs magassága és a völgy mélysége fogják adni. Az elméleti profilnál a maximális érdesség (R_{max}) és az egyenetlenség-magasság (R_z) értékei és számítási módjai megegyeznek.



6.2. ábra. Kinematikai és geometria viszonyokból eredő érdességprofil

A forgácsolt felület profilján az érdességcsúcs magasságát megkapom, ha annak axiális irányú helyzetét a 3.20. egyenletbe behelyettesítem. Az ismétlődés és a szimmetria miatt az eredő axiális előtolás felénél kell keresni a profil magasságát a 6.1. egyenlet szerint. A fentiek segítségével meghatározom az egyenetlenség-magasság elméleti összefüggését (6.2. egyenlet). Az elméleti érték függ a szerszám sugarától, a szerszám fordulatszámától, a szerszám szögsebességétől, a kiegészítő axiális előtoló sebességtől, az él emelkedési szögétől (terelőszögétől), valamint a munkadarab megmunkált felületének sugarától.

$$R_z = \xi_m \left(\frac{f_a}{2} \right) \quad (6.1)$$

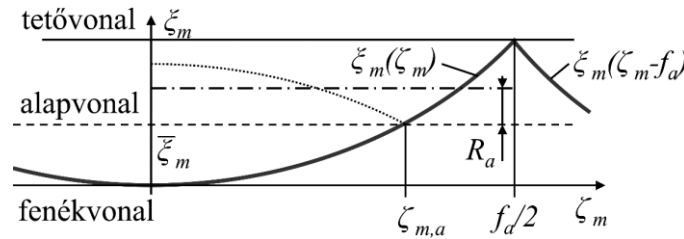
$$R_z = a_w \cos \frac{\pi \left(\frac{\omega_s r_s}{tg \lambda_s} + v_{s,a} \right)}{\omega_m r_m + \omega_s r_s} - r_m - \sqrt{r_s^2 - a_w^2 \sin^2 \frac{\pi \left(\frac{\omega_s r_s}{tg \lambda_s} + v_{s,a} \right)}{\omega_m r_m + \omega_s r_s} + v_{s,a}} \quad (6.2)$$

6.1.2 Az átlagos érdesség

Rotációs esztergálásnál az átlagos érdesség meghatározásához a 6.2. ábrán látható forgácsolt felület 6.3. ábrán látható részét elég vizsgálni a periodikusan ismétlődő forgácsolt felület szimmetriatulajdonsága miatt. A szabvány [135] szerint az átlagos érdesség az 6.3. egyenlet szerinti integrálás megoldásával adható meg az elméleti profilra. A $\xi_m = \bar{\xi}_m$ a vízszintes tengellyel párhuzamos egyenes (alapvonal) egyenlete, amely alatt és fölött elhelyezkedő görbe által határolt területek nagysága egyenlő. A vizsgált profil ζ_m tengelyre számított integráltja és az elemzett hossz hányadosa adja meg a keresett értéket. Ez a 6.3. ábrán bemutatott esetre a 6.4. egyenletet eredményezi.

$$R_a = \frac{1}{f_a} \int_{-f_a/2}^{f_a/2} |\xi_m - \bar{\xi}_m| d\zeta_m \quad (6.3)$$

$$\bar{\xi}_m = \frac{2}{f_a} \int_0^{f_a/2} \xi_m(\zeta_m) d\zeta_m \quad (6.4)$$



6.3. ábra. Az átlagos érdesség származtatása

A fenti értelmezésből következik, hogy 6.3. egyenlet átalakítható. Egyrészt a vizsgált profil szimmetriája miatt az integrálás alsó határa 0 lehet a $-f_a/2$ helyett. Másrészt az integrálási tartományt célszerű két részre osztani, külön számolva az alapvonal alatti és fölötti terület nagyságát. A vízszintes tengelyen értelmezett $\zeta_{m,a}$ koordináta bontja ketté a tartományt, amelynél a 6.3. ábrán látható módon az alapvonal elmettzi a vizsgált görbét, vagyis teljesül a $\xi_m(\zeta_{m,a}) = \bar{\xi}_m$ összefüggés. Így R_a elméleti értékét a 6.5. egyenlet megoldása jelenti.

$$R_a = \frac{2}{f_a} \left[\int_0^{\zeta_{m,a}} (\bar{\xi}_m - \xi_m) d\zeta_m + \int_{\zeta_{m,a}}^{f/2} (\xi_m - \bar{\xi}_m) d\zeta_m \right] \quad (6.5)$$

Az átlagos érdesség elméleti értékének meghatározásához először az elemzett profil alapvonalának helyzetét kell megadni. A 6.4. egyenletet megoldásához a 3.20. egyenlet közelítése szükséges. A függvény alakja és tulajdonságai miatt hatod rendű Taylor-hatványsorba fejtést választottam, így a 6.6. egyenletet kapom. A közelítési hiba $\zeta_m = 0,5$ mm értéknél (ami az 1 mm/ford. előtolást jelenti) a függvényanalízis szerint $H \leq 0,0005739$ mm, ha $r_s \geq 6$ mm, $r_m \geq 6$ mm, $\lambda_s \leq 50^\circ$ (az egyéb paraméterek tetszőlegesen lehetnek).

$$\xi_m(\zeta_m) = \frac{\omega_m^2 \zeta_m^2 r_m (r_s + r_m)}{2r_s \left(v_{s,a} + (r_s \omega_s + r_m \omega_m) \operatorname{ctg}(\lambda_s) \right)^2} \quad (6.6)$$

A 6.4. egyenlet által kijelölt matematikai műveleteket elvégezve a 6.6. egyenletre kapom az alapvonal függőleges tengelyen vett helyzetét (6.7. egyenlet).

$$\bar{\xi}_m = \frac{r_m \pi^2 \left(v_{s,a} + r_s \omega_s \operatorname{ctg}(\lambda_s) \right)^2 (r_s + r_m)}{6 r_s \left(v_{s,a} + (r_s \omega_s + r_m \omega_m) \operatorname{ctg}(\lambda_s) \right)^2} \quad (6.7)$$

A következő lépés a $\xi_m(\zeta_{m,a}) = \bar{\xi}_m$ feltételből $\zeta_{m,a}$ meghatározása. A keresett értéket a 6.8. egyenlet alakjában kapom a 6.7. egyenletet behelyettesítve a 6.6. egyenletbe.

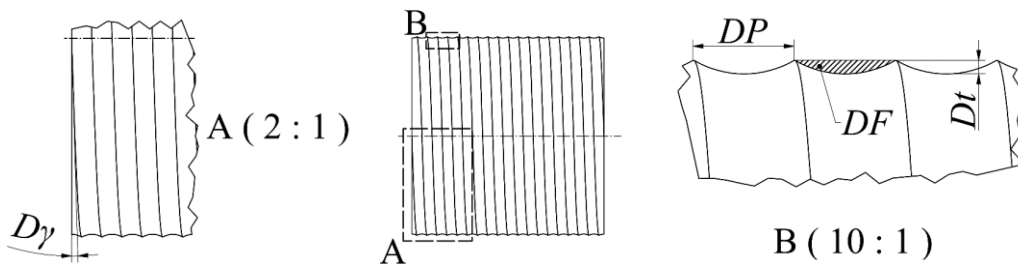
$$\zeta_{m,a} = \frac{\pi \sqrt{3}}{3 \omega_m} \left(\frac{r_s \omega_s}{\operatorname{tg} \lambda_s} + v_{s,a} \right) \quad (6.8)$$

Az átlagos érdesség elméleti értéke a 6.9. egyenlet alapján határozható meg.

$$R_a = \frac{\frac{2\sqrt{3}}{27} r_m \pi^2 \left(1 + \frac{r_m}{r_s} \right) \left[\frac{r_s^2 \omega_s^2 - v_{s,a}^2}{2} \cos^2(\lambda_s) + r_s \omega_s v_{s,a} \sin(\lambda_s) \cos(\lambda_s) + \frac{v_{s,a}^2}{2} \right]}{\frac{(r_s \omega_s + r_m \omega_m)^2 - v_{s,a}^2}{2} \cos^2 \lambda_s + v_{s,a} (r_s \omega_s + r_m \omega_m) \cos(\lambda_s) \sin(\lambda_s) + \frac{v_{s,a}^2}{2}} \quad (6.9)$$

6.2 A megmunkált felület sodratossága

Sodratos topográfiának nevezzük a forgácsoló szerszám által a munkadarab megmunkált felületén generált olyan periodikus jellegű lenyomatot, amely az alkatrész forgása közben a felületen tengelyirányú szállító hatást fejt ki. Ennek a topográfiának a menetekhez hasonlóan emelkedési szöge van. Tengelyek megmunkálásakor a működési követelmények megkívánják, hogy a felületek sodratossága minél kisebb, illetve sodratmentes legyen. A sodratosságot jellemző paraméterek szabvány [136] által is definiáltak (6.4. ábra), melyek a következők: DP – sodrat periódushossza [mm], $D\gamma$ – sodrat emelkedési szöge [°], Dt – sodrat mélysége [μm], DG – sodrat spirálok száma [db], DF – sodrat elméleti keresztmetszete [μm^2]. A sodratparaméterek általában az érdességi mérőszámok tartományában vannak. Egyes jellemzők megegyeznek a megfelelő érdességi mérőszámokkal (a periódushossz (DP) a közepes barázdaszélességgel (R_{sm}), a mélység (Dt) a egyenetlenség-magassággal (R_z)).



6.4. ábra. A sodrat paramétereinek értelmezése

A 6.1. fejezetben leírt módszer segítségével megadom a számítási módszereket, amelyekkel a sodrat különböző paramétereinek elméleti értékei határozhatóak meg. A fenti paraméterek elméleti értékeit megvizsgálva esztergáló megmunkálások esetére a következő általános megállapítások mondhatóak el. A sodrat periódushossza a felületen képződő profil ismétlődési gyakorisága, ezért a kinematikai viszonyok miatt megegyezik az axiális irányú előtolás értékével. A sodrat emelkedési szöge a csavarvonalú geometria miatt a periódushosszból és a megmunkált felület kerületéből számítható. A sodrat magassága számértékben megegyezik az egyenletlenség-magasság elméleti értékével. A megállapításokat a 6.10 egyenlet tartalmazza.

$$DP = f_a; \quad D\gamma = \arctan \frac{DP}{2\pi r_m}; \quad Dt = R_z \quad (6.10)$$

A sodratos topográfia periódushossza a csúcsok ismétlődési gyakorisága, ezért az eredő axiális előtolással egyezik meg. Emiatt számítása a 6.11. egyenlet segítségével végezhető el. A sodrat emelkedési szöge a munkadarab kerületének és a sodrat periódushosszának hányadosával számítható. Így a 6.12. egyenlet összefüggése írható fel. A sodrat mélysége a forgácsolt felület egyenletével és a sodrat periódushosszával fejezhető ki, elméleti értéke megegyezik a felület egyenletlenség-magasságával. Így a keresett paraméter a 6.13. egyenlet szerint számítandó.

$$DP = 2\pi \frac{\omega_s}{\omega_m} \left(\frac{r_s}{tg \lambda_s} + \frac{v_{s,a}}{\omega_s} \right) \quad (6.11)$$

$$D\gamma = \arctan \frac{DP}{2\pi r_m} = \arctan \left[\frac{\omega_s}{r_m \omega_m} \left(\frac{r_s}{tg \lambda_s} + \frac{v_{s,a}}{\omega_s} \right) \right] \quad (6.12)$$

$$Dt = a_w \cos \frac{\pi \left(\frac{\omega_s r_s}{tg \lambda_s} + v_{s,a} \right)}{\omega_m r_m + \omega_s r_s + v_{s,a}} - r_m - \sqrt{r_s^2 - a_w^2 \sin^2 \frac{\pi \left(\frac{\omega_s r_s}{tg \lambda_s} + v_{s,a} \right)}{\omega_m r_m + \omega_s r_s + v_{s,a}}} \quad (6.13)$$

6.3 A befolyásoló paraméterek hatása

Ebben az alfejezetben megvizsgálom, hogy a rotációs esztergálást meghatározó geometriai és kinematikai paraméterek hogyan befolyásolják az elméleti profilt és a vizsgált mérőszámokat a 2.2. fejezetben megadott vizsgálati tartományon.

6.3.1 Az elméleti érdességi profil változása

Először a munkadarab fordulatszámának hatását vizsgáltam. Rotációs esztergálásnál a szerszám előtoló mozgása és a munkadarab forgó főmozgása kinematikai szempontból függetlenek, ezért a munkadarab fordulatszámának változásával a fordulatonkénti előtolás értéke is változik. A vizsgálathoz a kiindulási adatokhoz képest a munkadarab fordulatszámát változtattam a többi paraméter változatlanul hagyása mellett a 6.1. táblázat szerint.

6.1. táblázat. A munkadarab fordulatszám hatása az érdességprofilra

	n_s [1/min]	n_m [1/min]	λ_s [°]	r_s [mm]	d_m [mm]	$v_{s,a}$ [mm/s]	v_c [m/min]	f_a [mm/ford.]	R_a [μm]	R_z [μm]
a)	2	800	30	40	40	0	100,53	1,09	0,94	3,67
b)		1600					201,06	0,54	0,24	0,92
c)		2400					301,59	0,36	0,11	0,41

a)		b)		c)	
----	--	----	--	----	--

6.2. táblázat. A forgácsoló él terelőszögének hatása az érdességprofilra

	n_s [1/min]	n_m [1/min]	λ_s [°]	r_s [mm]	d_m [mm]	$v_{s,a}$ [mm/s]	v_c [m/min]	f_a [mm/ford.]	R_a [μm]	R_z [μm]
a)	2	1600	15	40	40	0	201,06	1,17	0,24	0,92
b)			30					0,54		
c)			45					0,31		

a)		b)		c)	
----	--	----	--	----	--

A munkadarab fordulatszáma az eredeti érték felével csökkent, illetve növekedett (6.1. táblázat). A fordulatszám növelésével csökken az érdesség értéke és az ismétlődési távolság értéke is. Az n_m 1,5-szeresére növelése 55%-kal csökkentette R_a és R_z értékét, mivel az eredő axiális előtolás csökken 33%-kal. Tehát magasabb munkadarab-fordulatszámon (ami magasabb forgácsoló sebességet eredményez) kisebb elméleti érdességű felületet kapunk.

Az érdességprofil befolyásoló paraméterek közül következőként az él emelkedési szögének változásának hatását vizsgálom (6.2. táblázat). Ebben az esetben a bázis értékek közül csak a terelőszög változott a többi paraméter változatlan értéke mellett. A kiindulási 30°-os értéke 50%-kal csökkent, illetve nőtt, ami eredményezte rendre az a) és a c) esetet. Megfigyelhető a 6.2. táblázat értékeiből, hogy az érdesség mérőszámai változatlanok maradtak. A terelőszög csökkentésével a profil alakja szélesebbé válik. Minél inkább közeledik a $\lambda_s = 0$ esethez (azaz a forgástengellyel párhuzamos élszakasz esetéhez), annál inkább ellaposodik a forgácsolt felület. Ekkor a (végtelen kicsi emelkedésű) csavarvonalú él egyenes vonalúvá válna. Ekkor a széles esztergakéssel való megmunkálás esetét kapnánk, ahol az elméleti érdesség 0-val egyenlő. Az egyenatlenség-magasság és az átlagos érdesség értéke azért nem változott, mert az emelkedési szög változtatásával a profil alakjának és periodicitásának változásai ellentétes hatást fejtenek ki kioltva egymás hatását. Ez okozza, hogy az érdességprofil elnyúlik a munkadarab szimmetriatengelyének irányába.

6.3. táblázat. A szerszám fordulatszám hatása az érdességprofilra

	n_s [1/min]	n_m [1/min]	λ_s [°]	r_s [mm]	d_m [mm]	$v_{s,a}$ [mm/s]	v_c [m/min]	f_a [mm/ford.]	R_a [μm]	R_z [μm]
a)	1	1600	30	40	40	0	201,06	0,27	0,06	0,23
b)	2							0,54	0,24	0,92
c)	3							0,82	0,53	2,07

a)	b)	c)

6.4. táblázat. A szerszámsugár hatása az érdességprofilra

	n_s [1/min]	n_m [1/min]	λ_s [°]	r_s [mm]	d_m [mm]	$v_{s,a}$ [mm/s]	v_c [m/min]	f_a [mm/ford.]	R_a [μm]	R_z [μm]
a)	2	1600	30	20	40	0	201,06	0,27	0,08	0,31
b)				40				0,54	0,24	0,92
c)				60				0,82	0,47	1,84

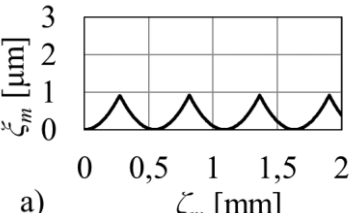
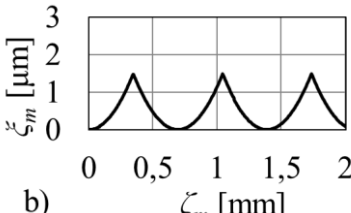
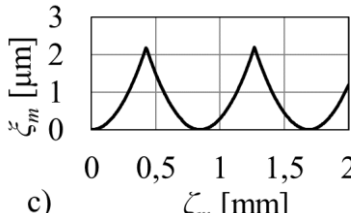
a)	b)	c)

A szerszám fordulatszámának változása is hatással van az elméleti érdességprofilra és az érdességi mérőszámokra. Az elméleti érdességprofileket elemezve (6.3. táblázat) látható, hogy mind a profil magasságában, mint a profil ismétlődési távolságában tapasztalható változás. Ennek oka, hogy a szerszám fordulatszámának változásával változik a körelőtölés nagysága és ezzel párhuzamosan az axiális irányú előtolás is. Lassabban forgó szerszám finomabb felületet hoz létre. A szerszám geometriai kialakítása állandó, ezért a forgácsoló él lenyomata (a forgácsolt felület) azonos. Viszont a lassabb/gyorsabb forgás esetén az elméleti profil ismétlődés gyakoribb/ritkább. Ezért az egymást ciklikusan követő görbék metszéspontjainak ζ_m értéke is változik. Továbbá látható a kiszámított értékekből, hogy az elméleti érdesség mérőszámai a szerszám fordulatszámának 50%-os növelésével közel 110%-kal növekednek meg.

Az elméleti érdességet befolyásoló tényezők sorában a szerszámsugár változásának vizsgálata következik a 6.4. táblázatban bemutatott paraméterekkel. A sugár 50 %-kal való változtatásával a csavarvonal alakú él burkolóhengerének sugara változik meg. Az ábrákon látszanak, hogy változik az elméleti érdességprofil egyenetlenség-magasság értéke és a profil ismétlődésének távolsága is. Ennek oka, hogy a szerszám burkolóhengerének változásával változik az él érintkező hossza a változatlan emelkedési szög miatt. Ugyanakkor a szerszám fordulatszáma is változatlan, ezért a forgó él kerületi sebessége megnő növekvő szerszámsugár esetén. Emiatt a körelőtölés értéke is nagyobb lesz, így az eredő axiális előtolás is nő. A leírt két hatás következtében tapasztalható az érdességprofilban változás.

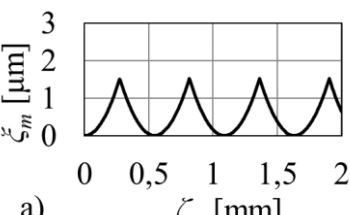
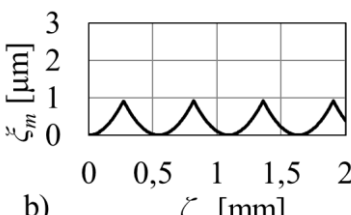
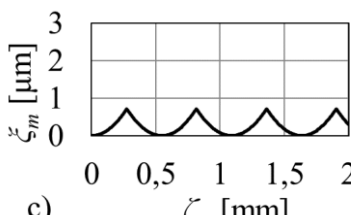
6.5. táblázat. A kiegészítő tengelyirányú előtolás hatása az érdességprofilra

	n_s [1/min]	n_m [1/min]	λ_s [°]	r_s [mm]	d_m [mm]	$v_{s,a}$ [mm/s]	v_c [m/min]	f_a [mm/ford.]	R_a [μm]	R_z [μm]
a)	2	1600	30	40	40	0	201,06	0,54	0,24	0,92
b)						4		0,69	0,38	1,50
c)						8		0,84	0,57	2,21

a)		b)		c)	
----	---	----	---	----	---

6.6. táblázat. A munkadarabátmérő hatása az érdességprofilra

	n_s [1/min]	n_m [1/min]	λ_s [°]	r_s [mm]	d_m [mm]	$v_{s,a}$ [mm/s]	v_c [m/min]	f_a [mm/ford.]	R_a [μm]	R_z [μm]
a)	2	1600	30	40	20	0	100,53	0,54	0,39	1,53
b)					40		201,06		0,24	0,92
c)					60		301,59		0,18	0,72

a)		b)		c)	
----	--	----	--	----	--

A kiegészítő axiális előtolás hatását mutatja az elméleti profilra a 6.5. táblázat. A bázisértékhez képest ($v_{s,a} = 0$ mm/s) két lépésben növeltem a vizsgált értéket 4 mm/s-mal, amely 0,15 mm/ford. növekedést okozott az eredő axiális előtolásban. A tengelyirányú előtolás növelése a forgácsolt felület alakját nem változtatta, különbséget az egymást követő görbék metszéspontjainak távolodó helyzete jelenti. Ezért a beállított $v_{s,a}$ jelentette 27%-os előtolásnövekedés a vizsgált érdességi mérőszámokat közel 60 %-kal növelte meg.

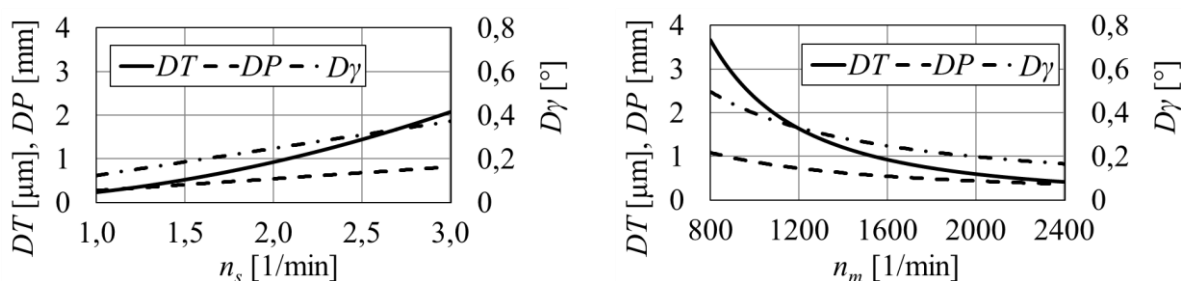
Végezetül a 6.6. táblázat különböző átmérőjű munkadarabfelületek érdességét mutatja változatlan beállítási és egyéb geometriai jellemzők mellett. A munkadarabátmérő egyenes arányosan növeli a forgácsoló sebességet, ugyanakkor az elméleti érdességet csökkenti: háromszor nagyobb d_m felére csökkenti a vizsgált érdességi mérőszámokat. Ennek oka a forgácsolt felület alakjának változása a megmunkált felületen kialakuló barázdák alapsíkkal bezárt szögének növekedése miatt.

6.3.2 A sodrat elméleti értékeinek vizsgálata

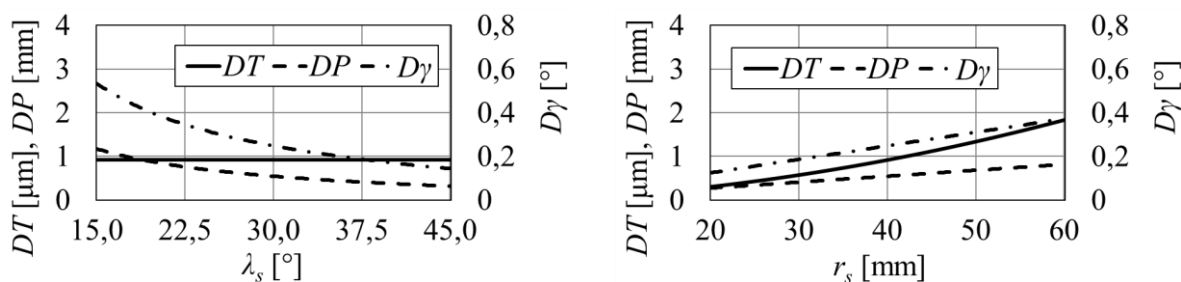
Az egyes sodratparaméterek elméleti értékeinek a 6.2. fejezetben történt meghatározásával lehetővé vált a rotációs esztergálás folyamatát meghatározó tényezők hatásának vizsgálata a megmunkált felület eme jellemzőire. Ezek a tényezők a szerszám és a munkadarab geometriai jellemzői, valamint a megmunkálás kinematikai jellemzői. Az összehasonlítást a 2.2 fejezetben ismertetett módon végzem el.

A 6.5. ábrán a szerszám és a munkadarab fordulatszámának hatását mutatom be a vizsgált sodratparaméterekre. A szerszámfordulatszám legnagyobb befolyást a sodrat mélységére gyakorolja: háromszoros növelése n_s -nek kilencszeres növekedést okoz DT -ben. A szerszámfordulatszám a sodrat periodicitására és szögére közel egyforma, lineáris hatással van. A munkadarab fordulatszámának növelése csökkenti a felület sodratosságát: háromszor akkora n_m 89 %-kal csökkenti a DT -t, 66 %-kal a DP -t és a $D\gamma$ -t.

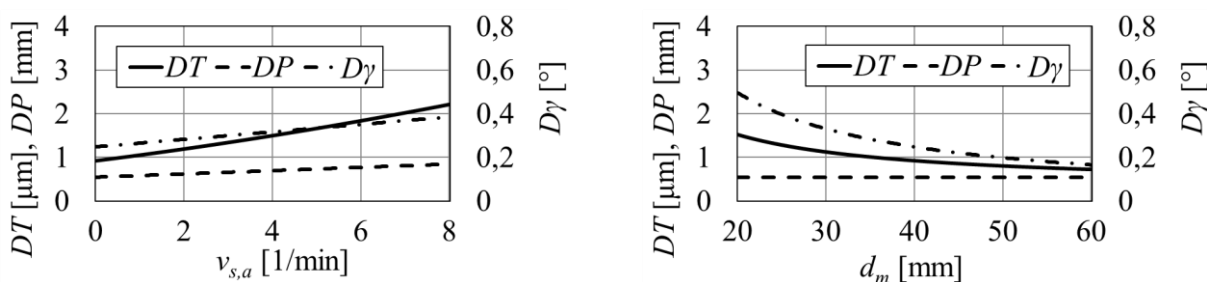
A szerszám geometriai adatainak (terelőszög és szerszámsugár) hatását vizsgálom a 6.6. ábra alapján. A terelőszög növelése a periódushosszat és az emelkedési szöget is csökkenti. Ennek oka az előtolás csökkenése λ_s növelésekor, ezáltal a szerszám lenyomata kisebb távolsággal ismétlődik, $D\gamma$ csökkenését is okozva. A vizsgált értékeknél a terelőszögnek a sodrat mélységére nincs hatással, mivel a forgácsolt felület alakját is változtatja. Nagyobb sugarú szerszámot alkalmazva a sodratosság vizsgált értékei növekedni fognak: háromszor r_s választásakor hatszor nagyobb lesz a DT és háromszor nagyobb a DP és $D\gamma$. A szerszámsugár a legintenzívebb hatást a sodrat mélységére gyakorolja.



6.5. ábra. A szerszám- (n_s) és a munkadarabfordulatszám (n_m) hatása a sodratparaméterekre



6.6. ábra. A terelőszög (λ_s) és a szerszámsugár (r_s) hatása a sodratparaméterekre



6.7. ábra. A kiegészítő előtolás ($v_{s,a}$) és a munkadarabátmérő (d_m) hatása a sodratparaméterekre

A 6.7. ábra a kiegészítő tengelyirányú előtolás és a munkadarabátmérő hatását mutatja. Amennyiben a körirányú mellett axiális mellékmozgás alkalmazására is szükség van, a sodratparaméterek növekedni fognak. Továbbá ha $v_{s,a}$ -t háromszorosára növeljük, a sodrat mélysége 54 %-al, az ismétlődési távolsága és az emelkedési szöge 24 %-kal növekszik.

Ugyanazon szerszámmal és technológiai adattal nagyobb átmérőjű felület megmunkálásakor a sodratosság nagy mértékben lecsökken. Háromszor nagyobb munkadarabátmérő megmunkálásakor DT 54 %-kal, $D\gamma$ 66 %-kal lesz kisebb. Az átmérő változás a periódushosszat nem változtatja, mivel az eredő előtolás sem változik.

6.4 Elméleti felületprofil vizsgálatának eredményei

A megmunkált felület elméleti profiljának jellemzéséhez meghatároztam érdességi és a sodratparaméterek számításához szükséges összefüggéseket. Az $\omega_m r_m = v_c$, $\omega_s r_s = v_{f,t}$, $\omega_m = 2\pi n_m$ és $r_s + r_m = a_w$ behelyettesítéseket elvégezve, valamint az eredő tangenciális előtolást megadva (6.14. egyenlet) egyszerűbb alakokat állítottam elő az egyenetlenség-magasságnak (6.15. egyenlet), az átlagos érdességnek (6.16. egyenlet), a sodrat periódushosszának (6.17. egyenlet), a sodrat emelkedési szögének (6.18. egyenlet) és a sodrat mélységének (6.19. egyenlet) a meghatározásához.

$$v_{f,t} + v_{s,a} \operatorname{tg} \lambda_s = v_{t,e} \quad (6.14)$$

$$R_z = a_w \cos \frac{\pi v_{t,e}}{v_c + v_{t,e}} - r_m - \sqrt{r_s^2 - a_w^2 \sin^2 \frac{\pi v_{t,e}}{v_c + v_{t,e}}} \quad (6.15)$$

$$R_a = \frac{\sqrt{3}\pi^2}{27} \frac{d_m a_w [2v_{t,e}^2 - 3v_{f,t} v_{s,a} \operatorname{tg} \lambda_s]}{r_s [2(v_c + v_{t,e})^2 - 3(v_c + v_{f,t}) v_{s,a} \operatorname{tg} \lambda_s]} \quad (6.16)$$

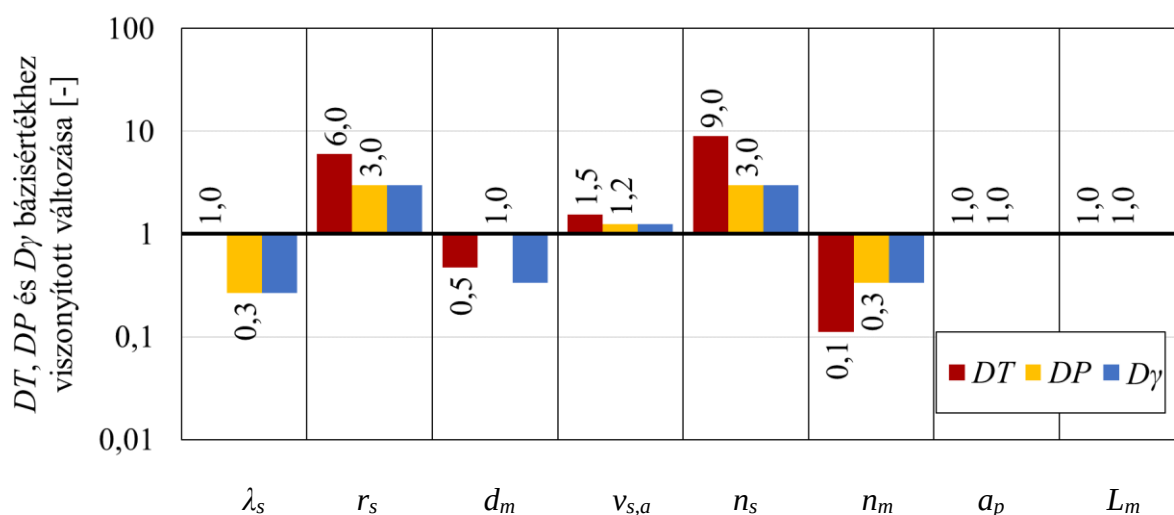
$$DP = \frac{v_{t,e} \operatorname{ctg} \lambda_s}{n_m} \quad (6.17)$$

$$D\gamma = \arctan \frac{v_{t,e} \operatorname{ctg} \lambda_s}{v_c} \quad (6.18)$$

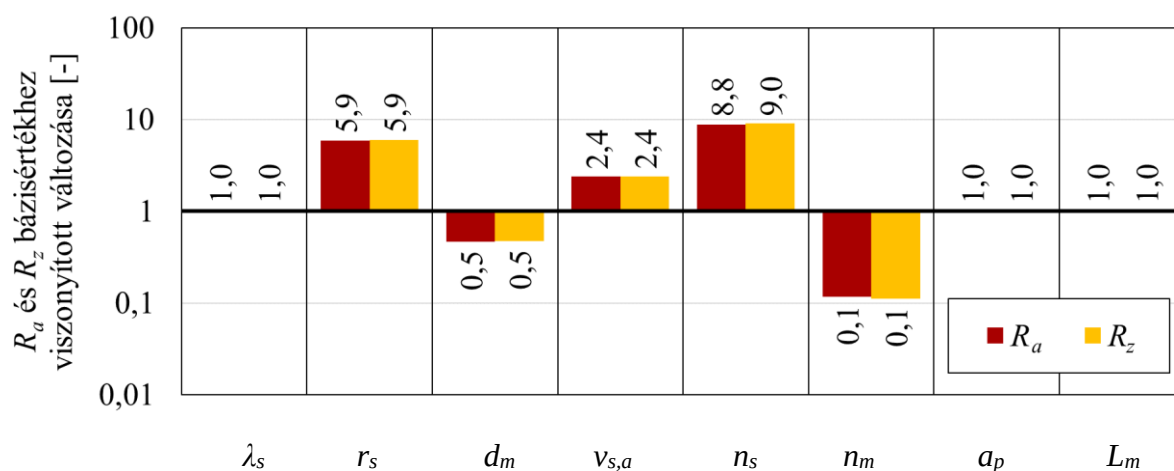
$$Dt = a_w \cos \frac{\pi v_{t,e}}{v_c + v_{t,e}} - r_m - \sqrt{r_s^2 - a_w^2 \sin^2 \frac{\pi v_{t,e}}{v_c + v_{t,e}}} \quad (6.19)$$

Megvizsgáltam a rotációs esztergálást meghatározó geometriai és kinematikai paraméterek hatását az elméleti értékekre, eredményeimet a 6.8. és a 6.9. ábrákon foglaltam össze, melyeken a vizsgált jellemző háromszoros változásának hatása látható.

Az érdesség elméleti értékeinek változása alapján (6.8. ábra) látható, hogy a legnagyobb hatást a szerszám és a munkadarab fordulatszáma jelenti. A szerszám geometriai jellemzői közül a terelőszög nem befolyásolja a vizsgált értékeket.



6.8. ábra. A rotációs esztergálást leíró paraméterek háromszoros értékének hatása az átlagos érdesség (R_a) és egyenetlenségmagasság (R_z) elméleti értékeire



6.9. ábra. A rotációs esztergálást leíró paraméterek háromszoros értékének hatása a sodrat mélység (DT) -periódushossz (DP) és -szög ($D\gamma$) elméleti értékeire

A 6.9. ábra alapján elmondható, hogy amennyiben a sodrat emelkedési szögét vagy a mélységét csökkenteni szeretnénk, a szerszám mozgását megadó sebességeket csökkenteni, a munkadarab fordulatszámát pedig növelni kell. A periódushossz növeléséhez a fenti paramétereket csökkenteni szükséges. Ezért az optimális technológiai adatok meghatározásakor a technológusnak mérlegelni kell, melyik sodratparaméter mértékét szeretné csökkenteni. A geometria paraméterek terén azt tapasztaltam, hogy a sodrat periódushosszának és az emelkedési szögének csökkentéséhez a szerszám terelőszögét növelni, a sugarát csökkenteni szükséges. A sodrat mélységének csökkentéséhez kisebb sugarú szerszám alkalmazása szükséges.

7 KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE

A forgácsleválasztást jellemző paraméterek számító képleteinek meghatározása és elemzése után a forgácsoló erő és a megmunkált felület érdességének kísérleti meghatározását és összehasonlító vizsgálatát végeztem el rotációs esztergálásnál. Azokra a kérdésekre kerestem választ a hosszelőtolásos és a körelőtolásos esztergálást összehasonlítva, hogy milyenek a forgácsleválasztás energetikai viszonyai és miben tér el a forgácsoló erő jellege, másrészt milyen mértékben különböznek a forgácsolt felület érdességi értékei a hosszesztergáláshoz képest rotációs esztergálással.

Az M.1 mellékletben bemutatott technológiai adatokra elvégeztem a kísérleteket a 2.3 fejezetben leírt módon. A kiértékelés során külön vizsgálom a forgácsoló erő és a felületi érdesség eredményeit.

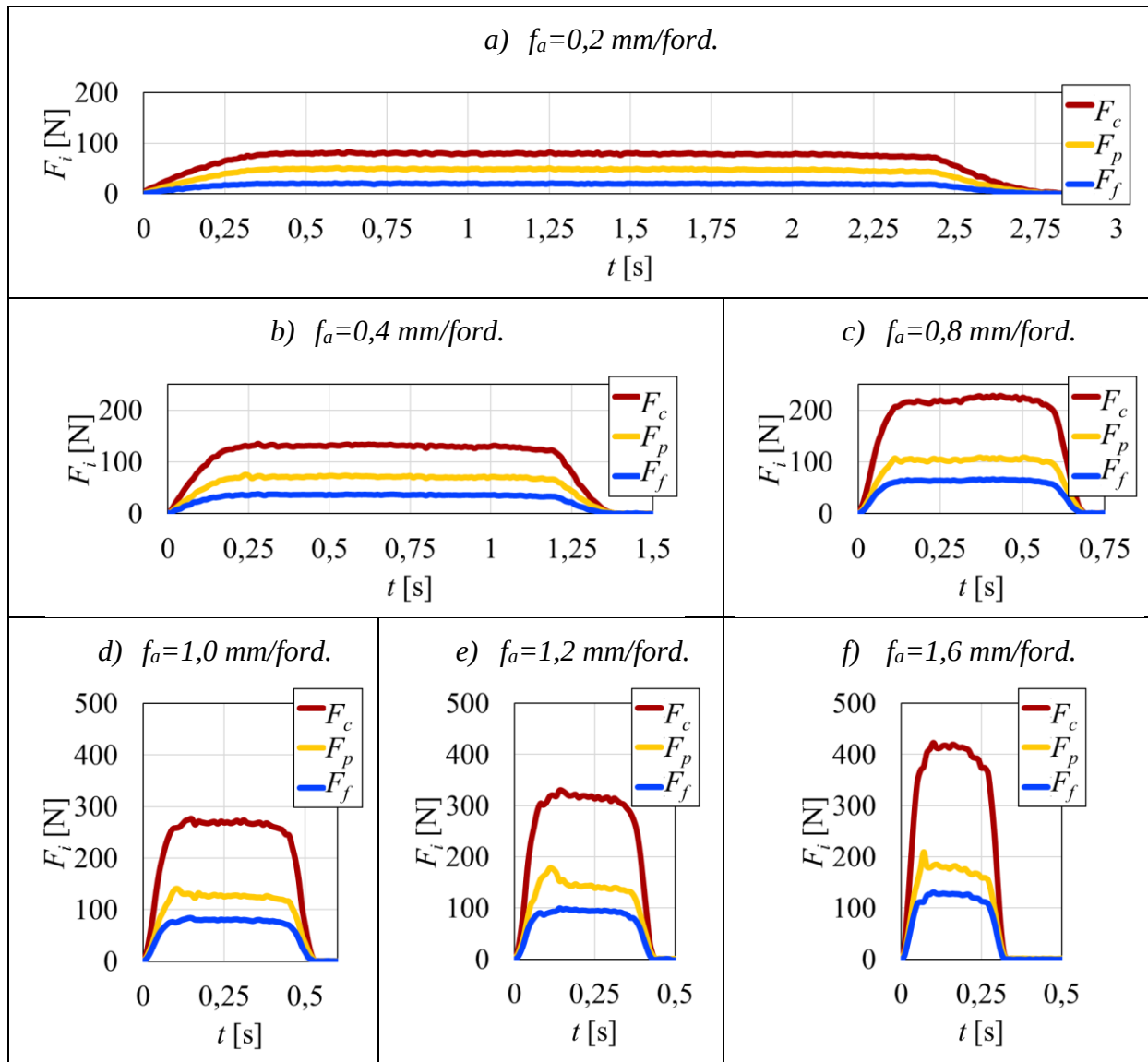
7.1 A forgácsolóerő mérési eredményeinek kiértékelése

A forgácsolóerő mérési eredményeit a 2.3.2 fejezetben leírt módon értékelem ki. Megvizsgálom a forgácsolóerő időbeli lefolyását. Ezt követően az erőkomponensek maximális és fajlagos értékét értékelem ki az állandó keresztmetszetű szakaszban. Végül a szerszámot érő dinamikus hatást vizsgálom a Bekezdési szakaszban.

7.1.1 A forgácsolóerő időbeli lefolyása

A 7.1. ábrán $R30$ szerszámmal, $a_p = 0,1$ mm fogásmélységgel, $v_c = 200$ m/min forgácsolósebességgel és különböző előtolással végzett megmunkálások erőmérés eredményeit mutatom be. Az ábrákon a szerszám fogásba lépése a $t = 0$ s időpillanatban van. A különböző előtolásokon végzett kísérleteknél a főforgácsoló erő a legnagyobb, melyet sorban a passzív erő és az előtolás irányú erő követ. A konstans forgácsoló erők mutatják az állandó forgácskeresztmetszetű forgács folyamatos leválasztásának szakaszát. Az ábrákon jól megfigyelhető a Bekezdési és a Befejező szakasz, melyet az egyes erőkomponensek folyamatos növekedése, illetve csökkenése jellemez. Ezek a szakaszok a szerszám nagy terelőszögű csavarvonalú éle miatt lényegesen hosszabb ideig tartanak. Az $R13$ és $R15$ szerszám esetén közel 8-szor, az $R30$ szerszámnál közel 4-szer, az $R45$ és $R50$ szerszámnál közel 2-szer hosszabb ideig tart az állandó keresztmetszetű forgácsleválasztás kialakulása, mint hagyományos szerszám esetén.

A görbék jellege azonos a 7.1. ábrán, de az előtolás növelése a következőket eredményezi. Az a) és b) ábrákon látható kis előtoláson a passzív erő közel 60%-a, az előtolás irányú erő közel 25%-a a főforgácsoló erőnek. A c) - f) ábrák nagy előtolásain megfigyelhető, hogy az F_p közel 50%-a, az F_f közel 30%-a az F_c erőnek. Vagyis az előtolás növelésével a forgácsoló erő komponenseinek nagysága mellett arányuk is megváltozik. A nagyobb előtolás kisebb főidőt jelent, viszont a Bekezdési, az Állandósult forgácskeresztmetszetű és a Befejező szakasz aránya állandó marad.



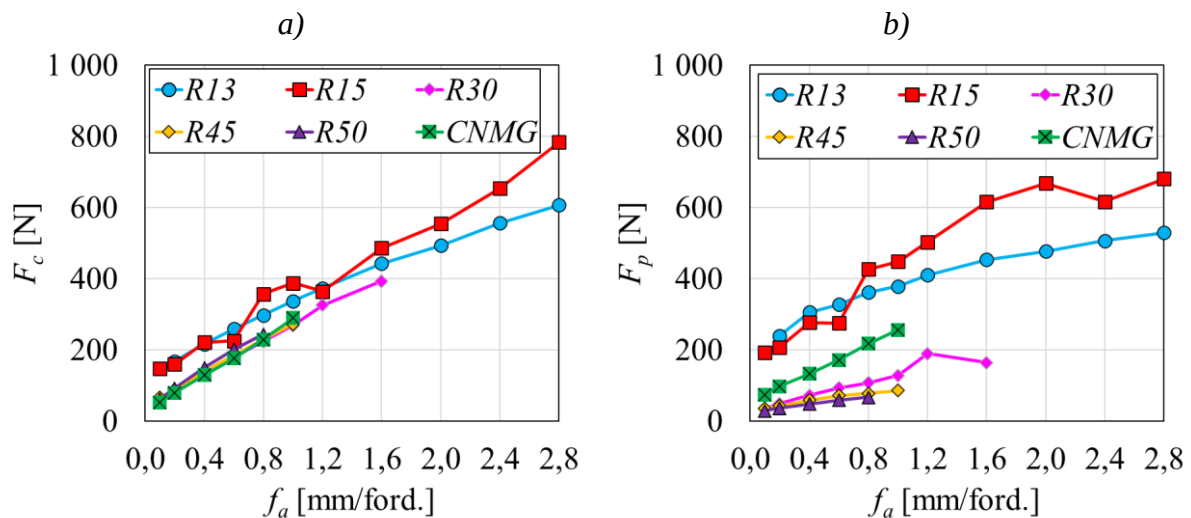
7.1. ábra. A forgácsoló erő komponensei az idő függvényében R30 szerszámnál
($a_p = 0,1$ mm, $v_c = 200$ m/min)

7.1.2 Erőkomponensek maximális értékei

Az állandó keresztmetszetű szakasz vizsgálatát az F_c , F_p és F_f erőkomponensek elemzésével kezdem a szerszámgeometria és az előtolás függvényében. Ezután elemzem a tengelysíkbán és az előtolás irányában ható erők főforgácsolóerőhöz viszonyított arányát.

A főforgácsoló erőt vizsgálva az eredmények és a 7.2.a) ábra alapján megállapítom:

- Közel azonos F_c értékeket kaptam egyrészt az R13 és R15 szerszámoknál, másrészt az R30, R45, R50 és CNMG esetén.
- Az R13 és R15 szerszámoknál 0,1-0,4 mm/ford. előtolás között 2-3-szor nagyobb F_c értéke a többi szerszámmal képest.
- Az előtolás növelésével az eltérés csökkenő tendenciát mutat (0,8 és 1,0 mm/ford. előtolásoknál már csak 1,33-szoros a különbség).
- Az előtolás növelés mértékétől kisebb arányban nő az F_c erőkomponens (az előtolás kétszeresére növelésekor közel 1,6-szeresére nő a főforgácsoló erő).



7.2. ábra. A főforgácsoló erő (F_c) és a tengelysíkban ható erő (F_p) változása az előtolás függvényében ($a_p = 0,1$ mm, $v_c = 250$ m/min)

A főforgácsoló erő eltéréseinek oka $R13$ és $R15$ szerszámok esetén, hogy a két váltólapkás rotációs esztergáláshoz alkalmazott szerszám esetén a csavarvonalú élen $0,11$ mm széles negatív homlokszögű élettörés került kialakításra ($R13$ -nál $-8,5^\circ$, $R15$ -nél $-12,5^\circ$).

A kísérleti eredményeket és a 7.2.b) ábrát elemezve az alábbi következtetéseket vonom le a passzív erőre nézve:

- Kétszeres előtolás esetén a tengelysíkban ható erő az $R13$ szerszámnál 1,2-szeresére, az $R15$ szerszámnál 1,4-szeresére, az $R30$ szerszámnál 1,5-szörösére, az $R45$ és $R50$ szerszámoknál 1,35-szörösére növekedett.
- $13,45^\circ$ és 15° terelőszögű szerszám alkalmazásakor ugyanazon előtoláson közel négyszerese lesz az F_p erő a 30 - 50° szerszámok eredményeihez képest.
- Az $R13$ és $R15$ szerszámok esetében F_p értéke 2,5-2-szerese lesz a hagyományos szerszámhoz képest.
- Az $R30$, $R45$ és $R50$ szerszámok esetében a $CNMG$ szerszámnál számítottakhoz képest 30-55%-a lesz tengelysíkban ható erő.

Az $R13$ és $R15$ szerszámok esetében a passzív erő növekedését a hagyományos szerszámhoz képest két jelenség okozza. Egyrészt a korábban már tárgyalt $0,11$ mm széles negatív homlokszögű élettörés. Másrészt a kis terelőszög megnöveli az egyszerre fogásban lévő szerszámélhosszt, és ezzel együtt csökkenti az él kiválasztott pontjaiban a főélelhelyezési szöget. Ez a jelenség növeli a tengelysíkban ható erőkomponenst a forgácsoló erő alapsíkbeli vetületének felbontásánál.

Az eredményekből következik továbbá, hogy a szerszám kiválasztásakor a terelőszög helyes megválasztásának kiemelt jelentősége van, mivel jelentősen befolyásolhatja a gyártott alkatrészek pontosságát a dinamikai rendszer rugalmas alakváltozásának növekedése. Legalább 30° -os terelőszögű szerszámmal végzett rotációs esztergálás esetén változatlan F_p erő mellett négyszeres előtolás állítható be a hagyományos esztergáláshoz képest, illetve egyforma előtolás esetén közel fele akkora passzív erővel számolhatunk a rotációs esztergálásra áttéréskor.

A 7.3. ábrán az előtolás-irányú erő változása látható. Rotációs esztergálás esetén a terelőszög változása alapján megállapítom, hogy a terelőszög növekedésével az előtolás-irányú erő növekszik. 0,4-1,2 mm/ford. tartományban az *R13* és *R15* szerszámok eredményezték a legkisebb előtolás-irányú erő értékeket. Az *R13* és *R15* szerszámokat vizsgálva 1,6 mm/ford. előtolás alatt közel egyforma F_f értéket kaptam, ettől nagyobb előtolásokon *R13* eredményei közel 20%-kal kisebbek. Az F_f az *R13* szerszámmal képest az *R30* szerszámmal közel 60%-kal, *R45* szerszámmal közel 110%-kal, *R50* szerszámmal 160%-kal nagyobb.

Az előtolás kétszeresése az *R13* és *R15* szerszámoknál közel 1,5-szeres, az *R30*, *R45* és *R50* szerszámoknál közel 1,7-szeres növekedést okoz.

A hosszleőtolású és a körelőtolású esztergálás összehasonlításából következik:

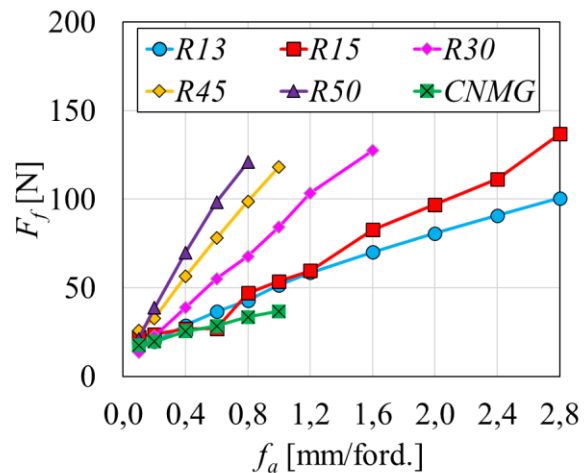
- A hagyományos esztergakésnél mértem a legkisebb előtolás-irányú erőket.
- A 13,45°-os és a 15°-os terelőszögű szerszámoknál 1,1-1,4-szeres, a 30°-os szerszámmal közel kétszeres, a 45°-os és 50°-os szerszámoknál közel 3-szoros növekedést tapasztaltam a *CNMG* szerszámmal képest.

Az előtolás-irányú és a főforgácsoló erő arányának változását mutatja a 7.4.a) ábra. Következtetésem a körelőtolású eljárás alkalmazásakor:

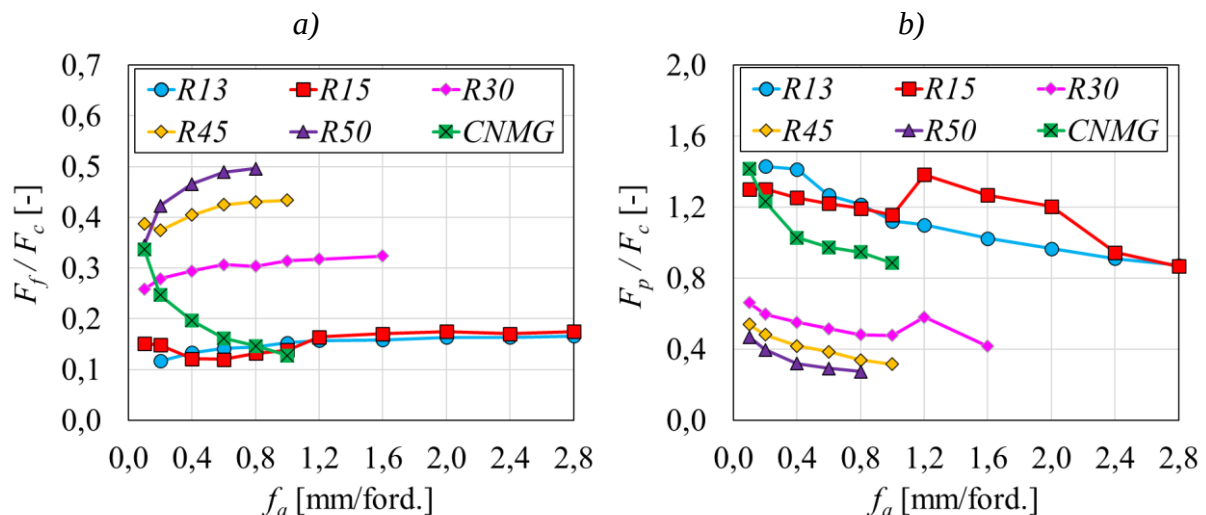
- Terelőszögtől függő előtolás fölött közel állandó aránnyal számolhatunk.
- Az állandósuló F_f/F_c arány értéke 0,3 az *R30* szerszámmal, 0,18 az *R13* és *R15* szerszámoknál. A vizsgálati tartományban F_f/F_c legnagyobb értéke (mely feltételezhetőleg közel egyforma az állandósuló értékkel) az *R45* szerszámmal 0,42, az *R50* szerszámmal 0,48.
- A közel állandó arányt adó minimális előtolás értéke csökken a terelőszög növekedésével: 13,45°-os és 15°-os szerszámmal 1,2 mm/ford., 30°-os szerszámmal 0,6 mm/ford., 45°-os és 50°-os szerszámmal 0,4 mm/ford.
- Az állandó érték eléréséig az F_f/F_c arány növekszik.

A *CNMG* szerszám esetében állandósuló szakaszt nem figyeltem meg, a 0,1-1,0 mm/ford. előtolások között az arány 0,35-ről 0,12-re csökken (ellentétben az eltérő szerszámgeometria miatti növekvő jelleggel körelőtolásnál). A hagyományos és rotációs esztergálást összehasonlítva megállapítom, hogy 0,2 mm/ford. előtolás fölött a *CNMG* szerszámmal képest a 30-50°-os terelőszögű szerszámmal nagyobb, míg a 13,45°-os és a 15°-os szerszámmal közel egyforma az F_f/F_c aránya.

A tengelysíkbán ható és a főforgácsoló erő arányát ábrázoltam a különböző előtolásoknál és szerszámoknál a 7.4.b) ábrán. Mind a hat szerszám esetében az F_p/F_c arány csökkenését tapasztaltam a vizsgált előtolásokon. Kétszer nagyobb előtolás esetén az arány az *R13* és *R15* szerszámok esetén közel 5%-kal, az *R30* és *CNMG* szerszámoknál közel 10%-kal, az *R45* és *R50* szerszámok esetén közel 15%-kal csökkent.



7.3. ábra. Az előtolás irányú erő (F_f) változása az előtolás függvényében ($a_p = 0,1$ mm, $v_c = 250$ m/min)



7.4. ábra. F_f/F_c és F_p/F_c arányok változása az előtolás függvényében ($a_p = 0,1$ mm, $v_c = 250$ m/min)

Rotációs esztergálás esetén a terelőszög változása szerint vizsgálva F_p/F_c aránya az 50°-os szerszámnál lesz a legkisebb. Ehhez képest azonos előtolás esetén a 45°-os szerszámnál 1,25-szerese, a 30°-os szerszámnál közel 1,7-szerese, 15°-os és 13,45°-os szerszámnál közel 4,2-szerese lesz a vizsgált arány az R50 szerszámhoz képest.

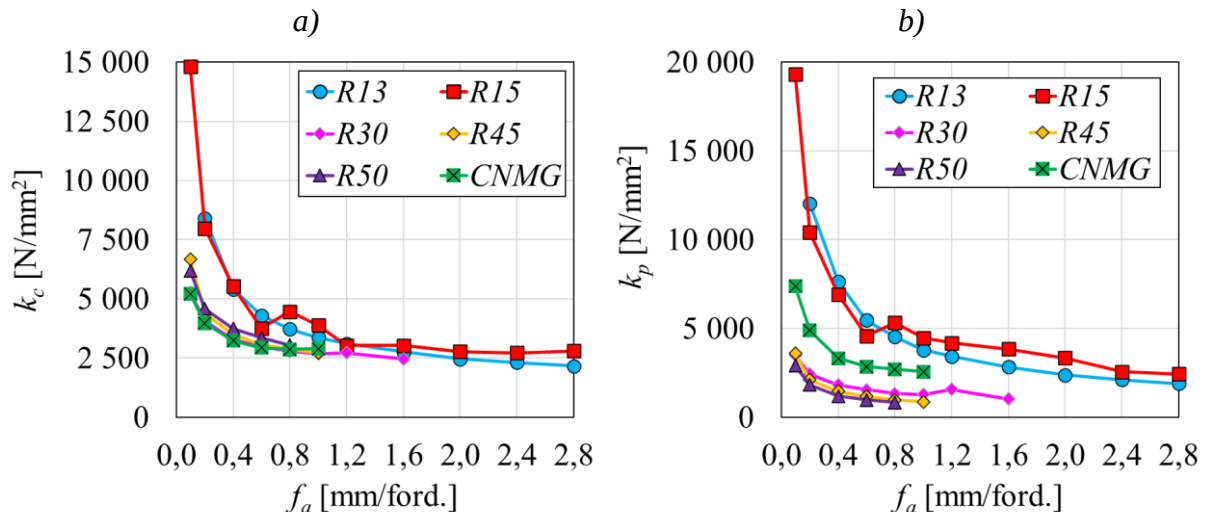
A hagyományos esztergáláshoz képest rotációs esztergálásnál az R13 és R15 szerszám esetén közel 25%-kal nagyobb, az R30-as szerszámnál 45%-kal kisebb lesz az F_p/F_c aránya. Az R45 szerszámnál közel 65%-os, az R50 szerszámnál közel 70%-os csökkenést tapasztaltam a CNMG szerszámnál számítottéhoz képest. A fentiekből látható, hogy 30°-os, vagy nagyobb terelőszögű szerszám alkalmazásával kedvezően befolyásolható a tengelysíkból ható passzív erő és a főforgácsolóerő aránya.

7.1.3 Fajlagos forgácsolóerők az Állandósult szakaszban

Az erőkomponensek vizsgálatokor megállapítottam, hogy az előtolás változásától kisebb mértékben növekszik. Ennek oka, hogy bár az előtolás növelésével együtt a forgácskeresztmetszet egyenes arányban nő, azonban a forgácsvastagság növekedésével a fajlagos forgácsolóerő csökken. Ezt a változást vizsgálom részletesebben a következőkben.

A fajlagos főforgácsolóerő változásáról (7.5.a) ábra) az alábbi megállapításokat teszem:

- Az előtolás növelésével (a forgácsvastagság növekedése miatt) mind a 6 szerszám esetében az egységnyi keresztmetszetre jutó terhelés csökken. Ez a csökkenés 0,1 – 0,6 mm/ford. intervallumban nagyobb mértékű.
- Az R30, R45, R50 és CNMG szerszámok esetében közel azonos értéket kaptam. 0,6 mm/ford.-tól nagyobb előtolásokon állandósul k_c értéke.
- Az R13 és R15 szerszámok esetén jelentősen (1,5 – 2-szer) nagyobb értéket kaptam a többi szerszámhoz képest 0,1 – 0,6 mm/ford. tartományban.
- Az R13, R15, R30 és CNMG szerszámok esetén 0,8 mm/ford.-tól nagyobb előtolásoknál a k_c értéke 2700-3000 N/mm². R13 és R15 szerszámok esetében 1,2 mm/ford.-nál nagyobb előtolások eredményezik ezt.



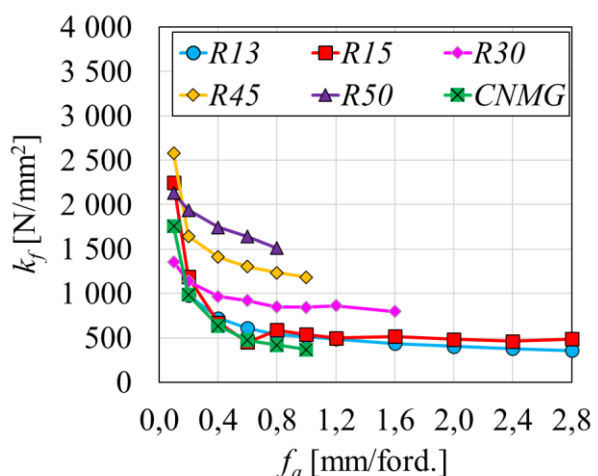
7.5. ábra. A fajlagos főforgácsoló erő (k_c) és a tengelysíkban ható fajlagos erő (k_p) változása az előtolás függvényében ($a_p = 0,1$ mm, $v_c = 250$ m/min)

A 7.5.b) ábrán a tengelysíkban ható erő fajlagos értékei láthatók, mely az előtolás növelésével csökken (k_c -hez hasonlóan). A fajlagos passzív erőre az alábbi következtetéseket vonom le:

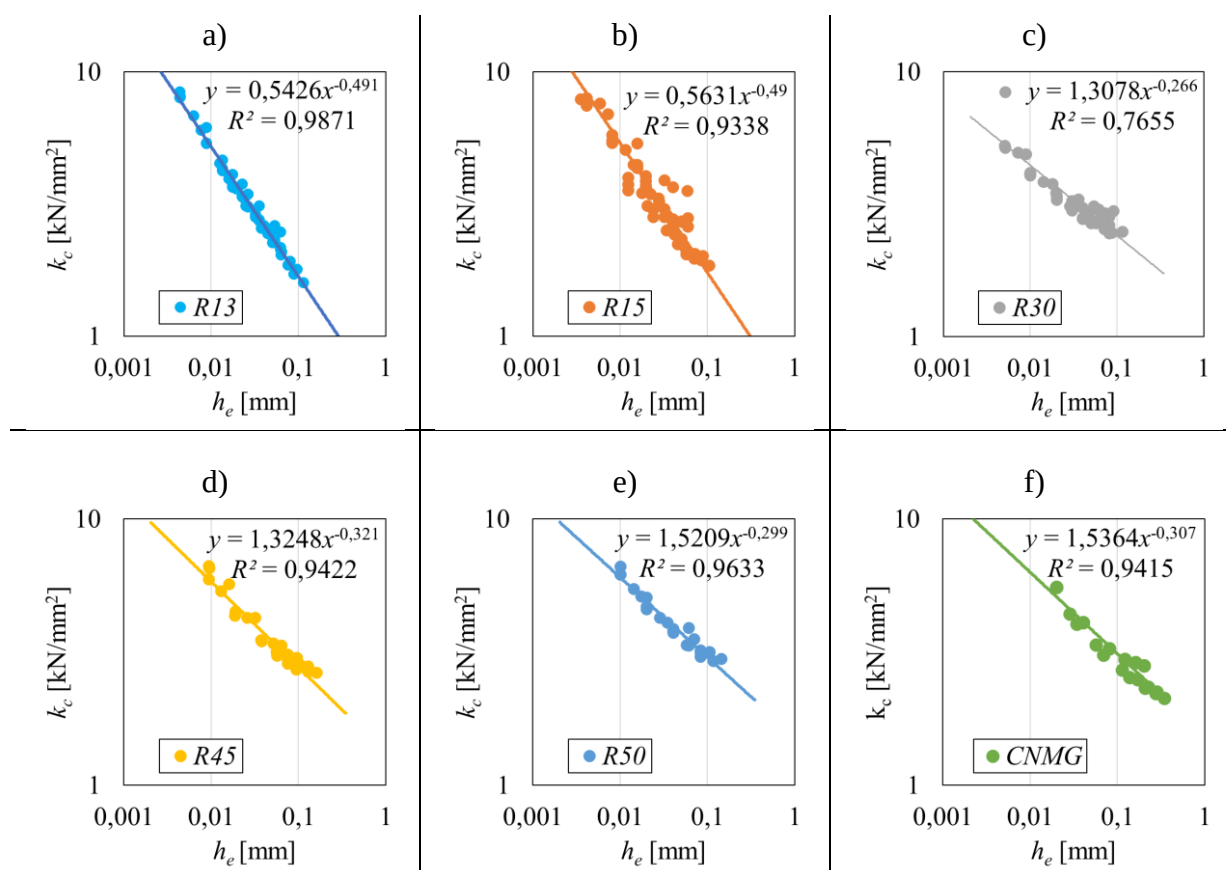
- Az R30, R45, R50 és CNMG szerszámoknál 0,4 mm/ford. előtolástól közel állandóvá válik a fajlagos érték.
- Az R13 és R15 szerszámoknál Állandósult érték nem figyelhető meg, azonban 1 mm/ford. előtolás fölött a fajlagos erő csökkenése lényegesen kisebb lesz.
- A vizsgált előtolásokon a hosszleőtolásos esztergáláshoz képest az R30, R45 és R50 szerszámok alkalmazása 50-60%-kal csökkentette k_p értéket.
- Az R13 és R15 szerszámoknál közel kétszerese a fajlagos erő a hagyományos szerszámhoz képest.

A fajlagos előtolás irányú erőt vizsgálva (7.6. ábra) megállapítom, hogy 0,4 mm/ford. előtolástól közel állandó a k_f az R13, R15, R30 és CNMG szerszámoknál. A különböző előtolásokon (kivéve 0,1 mm/ford.) hosszleőtolással kaptam a legkisebb értékeket.

Rotációs esztergálásnál nagyobb terelőszög nagyobb fajlagos előtolás irányú erőt jelent. A $\lambda_s = 15^\circ$ szerszámhoz képest a 30° -os szerszámmal kétszer, a 45° -os szerszámmal háromszor nagyobb lesz k_f . Ennek oka a szerszámél alapsíkbeli vetületén értelmezett pontokban számított főélelhelyezési szög növekedése a terelőszög növekedésével.



7.6. ábra. A fajlagos előtolás irányú erő (k_f) változása az előtolás függvényében ($a_p = 0,1$ mm, $v_c = 250$ m/min)



7.7. ábra. A fajlagos főforgácsolóerő az ekvivalens forgácsvastagság függvényében

A fajlagos főforgácsolóerőt megvizsgáltam a forgácsvastagság függvényében. Ehhez kiszámítottam a 4.2. fejezetben meghatározott egyenletek segítségével az ekvivalens forgácsvastagságot (a számítások eredményeit az M.2. melléklet tartalmazza).

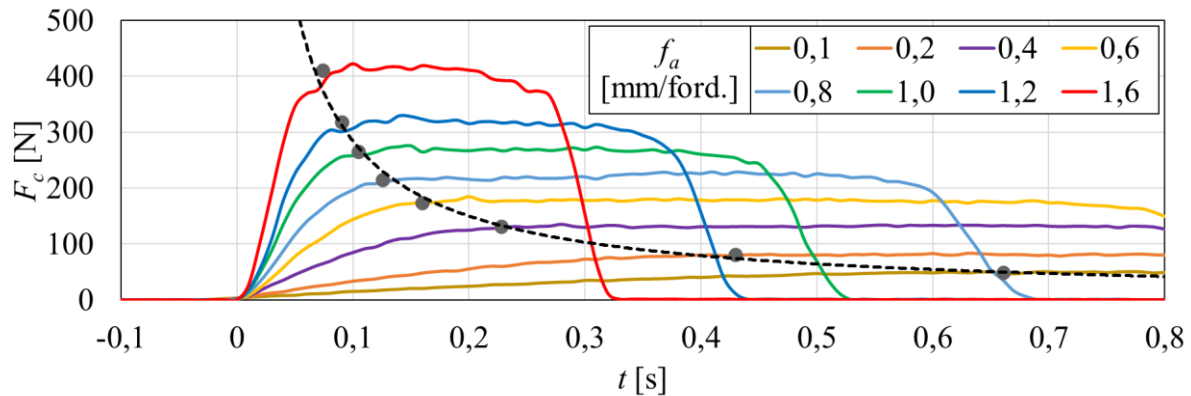
A 7.7. ábrán logaritmikus skálán prezentáltam szerszámonként az egyes beállításoknál a k_c értékét a h_e függvényében. A diagramokon ábrázolt pontokra regresszióanalízis segítségével hatványfüggvényt illesztettem, mely függvények és az R^2 determinációs együtthatók az ábrákon találhatóak ($R^2 = 1$ esetén 100%-os az illeszkedés).

A 6 diagramot vizsgálva megállapítom, hogy rotációs esztergálásnál az ekvivalens forgácsvastagság növelése a fajlagos forgácsolóerő csökkenését okozza. A vizsgált forgácsvastagságokon az $R13$ és $R15$ szerszámonknál tapasztaltam a legmeredekebb csökkenést (7.7.a-b). A másik négy esetben (7.7.c-f) kisebb mértékű csökkenést okozott h_e növelése. Az $R30$ szerszámnál lett a hatványkitevő értéke a legkisebb.

Az egyenletekből a hatványkifejezés szorzótényezőjeként kiolvasható, $h_e = 1$ mm-hez tartozó fajlagos főforgácsolóerő főértékét és a forgácsvastagság kitevőjét vizsgálva a következő megállapításokat teszem. A $13,45^\circ$ és a 15° terelőszögű szerszámnál közel azonos a főérték (rendre $542,6 \text{ N/mm}^2$ és $563,1 \text{ N/mm}^2$) és a kitevő is (-0,49). A 30° -os és a 45° -os szerszámnál a főérték szintén közel azonos ($1307,8 \text{ N/mm}^2$ és $1324,8 \text{ N/mm}^2$) azonban a kitevő értékében itt nagyobb különbség figyelhető meg (-0,266 és -0,321). Az $R50$ és a $CNMG$ szerszámnál ismét közel azonos a főérték ($1520,9 \text{ N/mm}^2$ és $1536,4 \text{ N/mm}^2$) és a kitevő értéke is (megközelítőleg -0,3).

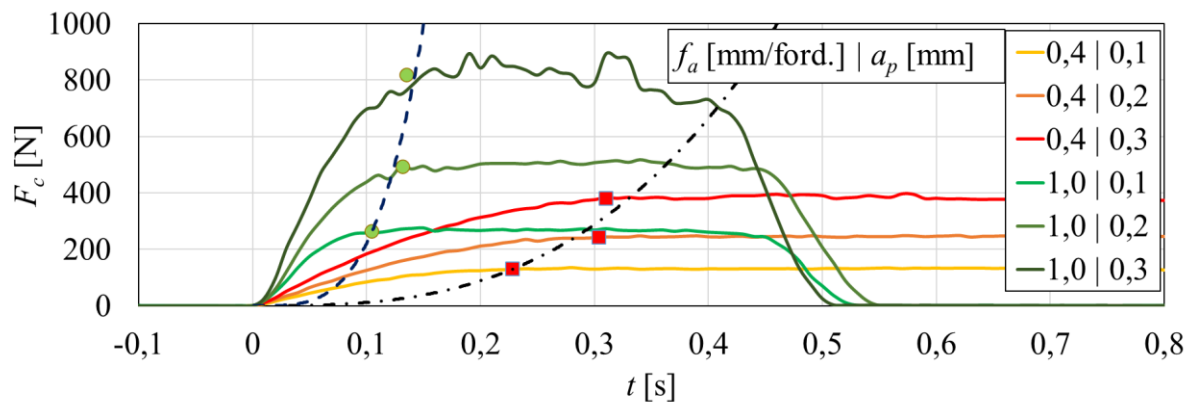
7.1.4 Dinamikus terhelés a Bekezdési szakaszban

A forgácsoló erő elemzését a fogásba lépés során tapasztalható dinamikus terhelés vizsgálatával fejezem be. A rotációs esztérgálást állandó keresztmetszetű forgács folyamatos leválasztása jellemzi külső hengeres felületek megmunkálásakor. A 4.1. fejezetben láthattuk, hogy a szerszámgeometria és a kinematikai viszonyok miatt a forgácsleválasztás Bekezdési és Befejező szakasza hosszabb lesz körelőtolás esetén a hosszfelőtoláshoz képest. Ez befolyásolja a forgácsoló élt erő dinamikus terhelést a fogásba lépés során. Ezért megvizsgálom a forgácsoló erő komponenseinek változását a Bekezdési szakasz során.



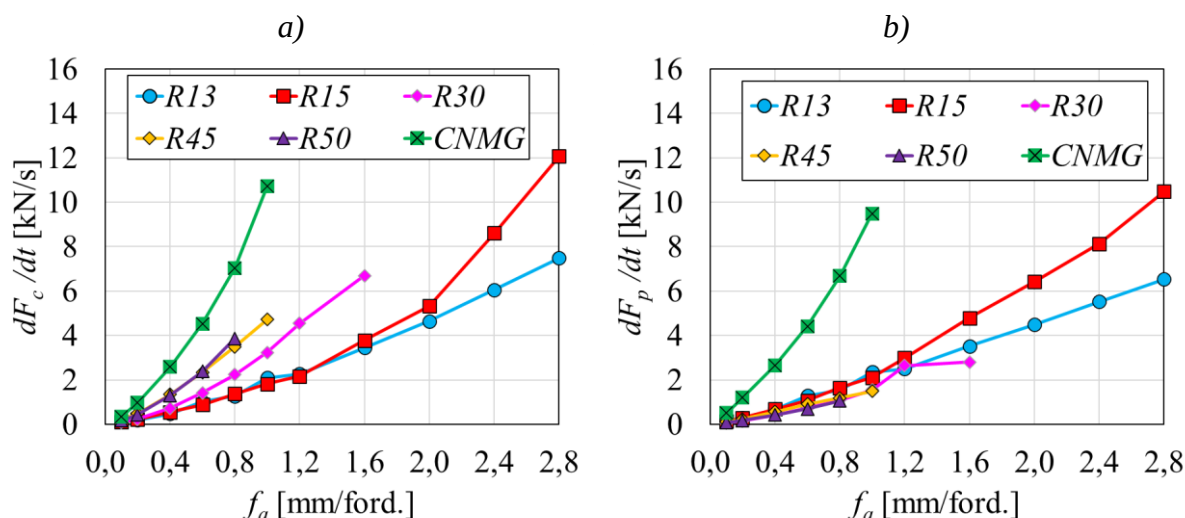
7.8. ábra. A főforgácsoló erő idő szerinti változása különböző előtolásoknál
 $\lambda_s = 30^\circ$ -os szerszámnál ($a_p = 0,1$ mm, $v_c = 200$ m/min)

A 7.8. ábrán látható, hogy az R30 szerszám esetén hogyan változik az idő szerint a főforgácsolóerő különböző előtolások esetén. Az ábrán pontokkal jelöltem a Bekezdési szakasz végét a 5.1.3. fejezet szerinti egyenlettel meghatározott idő segítségével. Az előtolás növelése hatására megnő a főforgácsoló erő, ugyanakkor a szerszám fogásba lépésétől a fogásból kilépésig tartó idejének csökkenésével az erő-idő diagram is keskenyebb lesz. E két hatásból ered, hogy az előtolás növelésével megnő a szerszámot érő dinamikus terhelés a növekvő főforgácsoló erő és a csökkenő bekezdési idő miatt.



7.9. ábra. A főforgácsoló erő idő szerinti változása különböző fogásmélységeknél
 $\lambda_s = 30^\circ$ -os szerszámnál $f_a = 0,4$ és $1,0$ mm/ford. előtolásoknál ($v_c = 200$ m/min)

A 7.9. ábra a főforgácsolóerő változását mutatja 0,4 és 1,0 mm/ford. előtolásoknál különböző fogásmélységeknél. A fogásmélységgel egyforma mértékben növekszik a főforgácsolóerő. Ugyanakkor a nagyobb fogásmélység azt is jelenti (ahogy az 5.3. fejezetben is láttuk), hogy a körmozgást végző csavarvonalú él hamarabb lép fogásba, emiatt az a_p növelése a Bekezdési szakasz idejét is megnöveli. Így a fogásmélység növekedésének mértékétől kisebb arányban nő a dinamikus hatás. 0,4 mm/ford. előtolásnál kétszeres fogásmélységnél 37%-kal, háromszoros fogásmélységnél 114%-kal lesz nagyobb a szerszámot érő érintőirányú dinamikus terhelés a Bekezdési szakasz során.



7.10. ábra. A főforgácsoló erő és a tengelysíkban ható erő idő szerinti első deriváltja az előtolás függvényében a Bekezdési szakasz során ($a_p = 0,1$ mm, $v_c = 250$ m/min)

A 7.10.a) ábra a főforgácsoló erő idő szerinti átlagos növekedését mutatja a Bekezdési szakasz során. A 7.1.2. fejezet szerint a szerszámgeometria a főforgácsolóerő nagyságát nem befolyásolja, viszont a komponens állandósulásához szükséges idejére hatással van.

Az R45 és R50 szerszámoknál, illetve az R13 és R15 szerszámoknál közel egyforma értékek adódtak. Az R30 szerszámhoz képest az érintő irányú dinamikus terhelés 0,5-0,6-szeresére csökkent a terelőszög 0,5-szeresére csökkentésekor, ugyanakkor 1,5-1,8-szeresére nőtt a terelőszög 1,5-szeresére növelésekor.

A legnagyobb értéket adott előtolásoknál a hosszlelőtolásos szerszámnál számítottam. A CNMG szerszámhoz képest a 45° és az 50° terelőszögű szerszámnál 46-56%-kal, a 30° -os szerszámnál közel 69%-kal, a $13,45^\circ$ és a 15° terelőszögű szerszámnál 78-83%-kal lesz kisebb a dinamikus terhelés azonos előtolás esetén. A hagyományos esztergálással megegyező F_c növekedést a 45° terelőszögű szerszámnál kétszeres előtolás, míg a 15° -os terelőszögű szerszámnál háromszoros előtolás eredményezi.

Az előtolás irányú erő változását a bekezdési szakasz során mutatja a 7.10.b) ábra. Rotációs esztergálásnál a különböző terelőszöggel rendelkező szerszámok esetén az egyes előtolásoknál közel azonos értéket kaptam. Bár az F_p erő idő szerinti változása a Bekezdési szakasz során közel azonos rotációs esztergálásnál, a 7.1.2. fejezet szerint az állandósuló értéke eltér. Ennek oka, hogy a 4.2.2. fejezetben leírt vizsgálataim szerint a terelőszög növelése csökkenti a Bekezdési szakasz idejét. Bár a különböző terelőszögeknél azonos az F_p növekedésének mértéke, kisebb λ_s esetén hosszabb ideig tart ez a növekedés, ezért nagyobb lesz a tengelysíkban ható erő értéke is a 7.2.b) ábrával összhangban.

A hosszlelőtolásos esztergálásnál (7.10.b) ábra) azonos előtolás esetén 5 – 6-szor nagyobb dinamikus hatást számítottam, illetve rotációs esztergálásnál 3 – 4-szer nagyobb

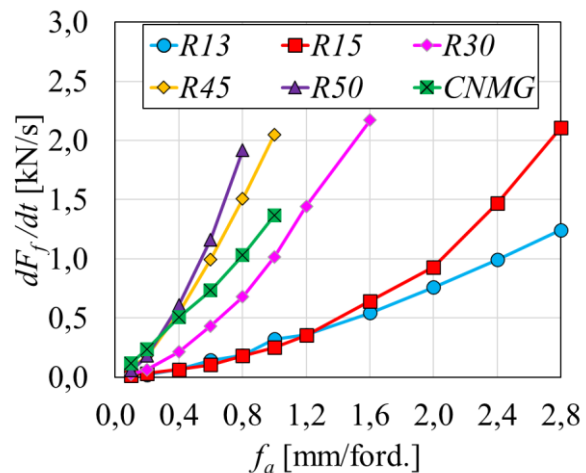
előtolást lehet választani ugyanakkora hatás eléréséhez. A kisebb mértékben változó F_p javíthatja a megmunkálási pontosságot a munkadarab és a szerszám közötti kisebb dinamikus terheléssel.

A 7.11. ábra az előtolás irányú erő változását mutatja a Bekezdési szakasz során. Rotációs esztergálás beállításaira megállapítom az eredmények és az ábra alapján, hogy F_f erő idő szerinti növekedésének mértékét a terelőszög növelése fokozza.

A legkisebb (0,1-1,2 mm/ford. előtolás között közelítőleg egyforma) dinamikus hatást az R13 és az R15 szerszámoknál számítottam. Az R45 és R50 szerszámoknál közel egyforma értéket tapasztaltam 0,6 mm/ford. előtolásig, 0,8 mm/ford. előtolásnál az 50°-os terelőszögű szerszámnál 33%-kal nagyobb a vizsgált jellemző.

Az R13 szerszámhoz képest az R30 szerszámnál 3-4-szer, az R45 szerszámnál 7-10-szer nagyobb az előtolás irányú dinamikus hatás.

A hosszolótolásos esztergáláshoz képest körelőtolással a 13,45-30° terelőszögű szerszámoknál kisebb, a 45-50° szerszámoknál nagyobb a dinamikus terhelés. Az R30 szerszám alkalmazásával 42-66%-ára, az R15 szerszámnál 13-18%-ára csökkenthető a vizsgált érték. Az R45 szerszámnál közel 40%-kal nő az előtolás irányú dinamikus hatás.



7.11. ábra. Az előtolás irányú erő idő szerinti első deriváltja az előtolás függvényében a Bekezdési szakasz során ($a_p = 0,1$ mm, $v_c = 250$ m/min)

7.2 Felületi érdesség kísérleti és elméleti értékeinek összehasonlító elemzése

A rotációs esztergálás kísérleti vizsgálata során a megmunkált felület minőségét az érdességi mérőszámok mérésével és elemzésével jellemzem. Először a különböző szerszámgeometriák és technológiai adatok esetén értékelem ki az eredményeket. Ezt követően a különböző, körelőtolással dolgozó szerszámoknál vizsgálom meg az elméleti és a valóságos érdesség viszonyát.

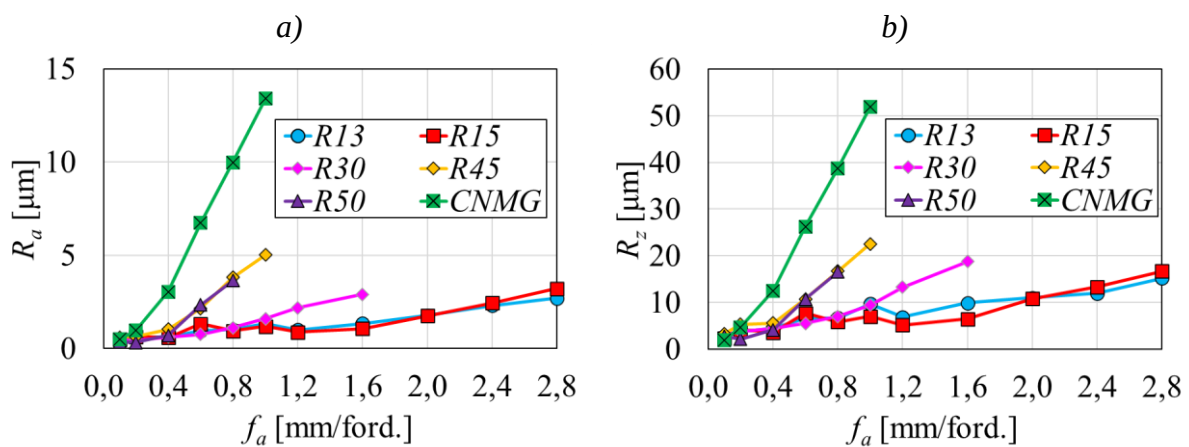
7.2.1 Kísérleti eredményeinek kiértékelése

Az átlagos érdesség (R_a) és az átlagos egyenetlenségmagasság (R_z) eredményeit 0,1 mm fogásmélység és 250 m/min forgácsolósebesség esetén elemzem részletesen (7.12. ábra). A rotációs és a hosszolótolásos esztergálásnál mért érdességi értékeket vizsgálva megállapítom, hogy azonos előtolás esetén a körelőtolás eredményezi a finomabb felületet. 0,4 mm/ford. előtolásnál háromszor nagyobb az érdesség mértéke. Nagyobb előtolásokon az R45 és R50 szerszámhoz képest 2,5-szer, az R13, R15 és R30 szerszámokhoz képest közel 5,5-szer nagyobb lesz az R_a és R_z értéke a hosszolótolásos eljárásnál a rotációs esztergáláshoz képest. Másképp megközelítve ugyanakkora érdesség eléréséhez 45° terelőszögű szerszámmal 2-szer, 30° terelőszögű szerszámmal 4-szer, 15° terelőszögű szerszámmal 6-szor nagyobb előtolás állítható be. Vagyis megfelelő szerszámgeometria választásával növelhető a hatékonyság.

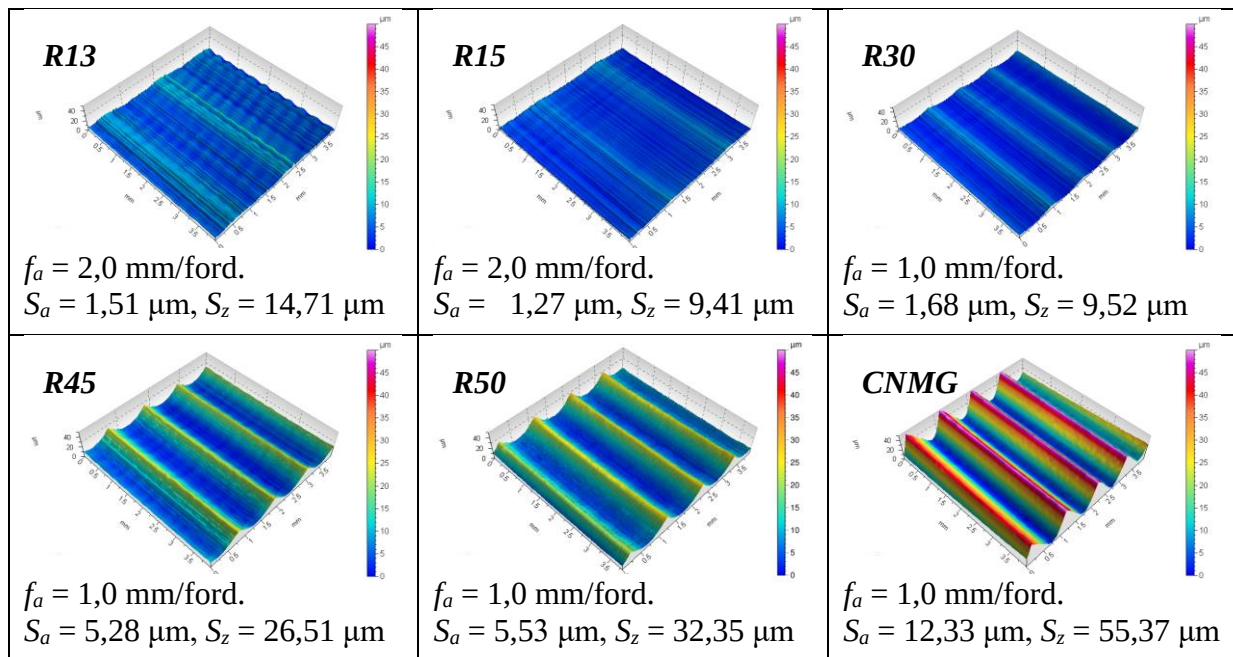
A körelőtolású megmunkálások összehasonlításakor megállapítom, hogy nincs jelentős különbség 0,1 – 0,4 mm/ford. előtolások között. Ebben a tartományban nem érvényesül a szerszámgeometria érdességre gyakorolt hatása. 0,6 – 1,0 mm/ford. intervallumban az R45 és az R50 szerszámoknál az előtolás-változással arányos érdességnövekedés figyelhető meg a másik három szerszámmal szemben. A 45° és az 50° terelőszögű szerszámok esetében mértékadó különbség nem jelentkezik a hasonló élgeometria miatt. 1,2 és 1,6 mm/ford. előtolásoknál megnő az érdesség a 30°-os szerszámnál is.

A 13,45° és a 15° terelőszögű szerszámoknál 2,0 mm/ford. előtolástól kezd az érdesség romlani. E két szerszámnál minimális eltérés figyelhető meg az érdességi értékekben a szerszámgeometria kis különbözősége miatt.

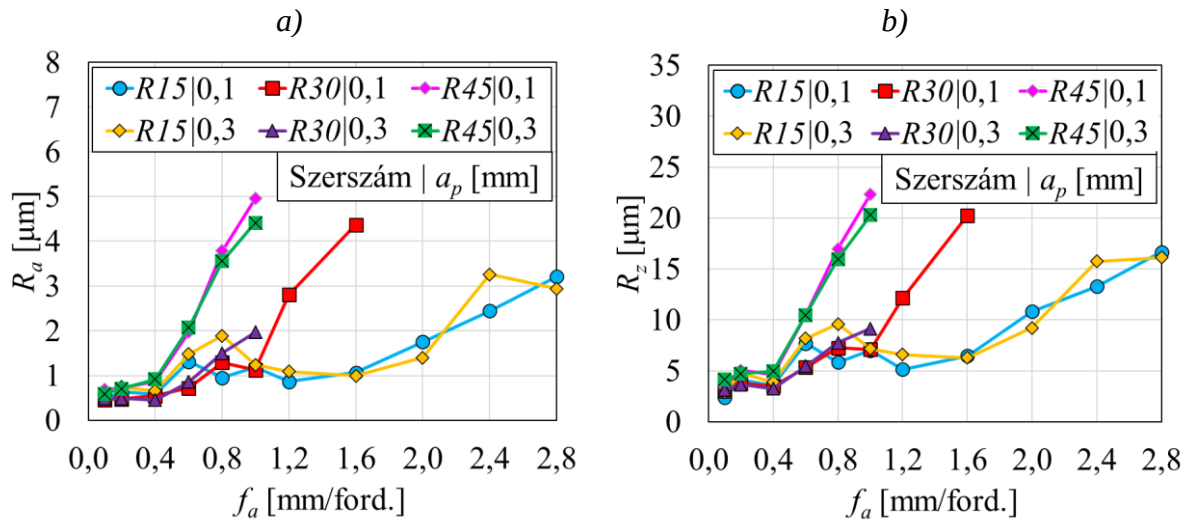
A 7.13. ábrán szerszámonként 1-1 beállítással megmunkált felületek háromdimenziós méréseinek eredményei láthatóak. A rotációs esztergálásnál lényegesen kisebb érdességi csúcsok jelennek meg a hosszfelőtolásos változathoz képest.



7.12. ábra. Az átlagos érdesség és egyenetlenség-magasság az előtolás függvényében ($a_p = 0,1$ mm, $v_c = 250$ m/min)



7.13. ábra. Megmunkált felületek 3D-s mérési eredményei ($a_p = 0,1$ mm, $v_c = 200$ m/min)



7.14. ábra. Az átlagos érdesség és egyenetlenség-magasság változása különböző fogásmélységeknél az előtolás függvényében $\lambda_s = 15^\circ$, 30° és 45° terelőszögű szerszámoknál

A 7.14. ábrán az $R15$, $R30$ és $R45$ szerszámok esetén vizsgáltam a fogásmélység növelésének hatását a felületi érdesség mérőszámaira. A legkisebb hatást a 45° terelőszögű szerszámnál tapasztaltam, ahol az egyes előtolásokon közel azonos értékeket kaptam a különböző a_p esetén. A fogásmélység növelése itt kismértékben csökkentette az R_a és az R_z értékét. A 30° -os szerszám esetében 0,8 mm/ford. előtolásig közel egyforma módon változik, 1 mm/ford. előtoláson az érdesség növekedését tapasztaltam. A 15° terelőszögű szerszámnál a vizsgált előtolásoknál a 0,1 mm fogásmélység alkalmazása egyenesen növekvő görbét eredményezett. A 0,3 mm a_p beállítása 1,6 mm/ford., 2,0 mm/ford. és 2,8 mm/ford. előtolásoknál csökkentette, 0,8 mm/ford., 1,2 mm/ford. és 2,4 mm/ford. előtolásoknál növelte az érdességi mérőszámok értékeit.

Összeségében megállapítom, hogy a fogásmélység 0,1 mm-ről 0,3 mm-re növelése számottevő hatást nem gyakorol a felületi érdességére. Ennek oka, hogy az a_p a forgácskeresztmetszetet leíró mérőszámok közül a forgács szélességet (és így többek között a forgácsolóerőt) befolyásolja elsősorban. A felületi érdesség szempontjából a másik paraméter, a forgácsvastagság bír nagyobb jelentőséggel, melynek megfelelő nagyságot kell elérnie a forgácseltávolítás okozta felületi sérülések csökkentésére.

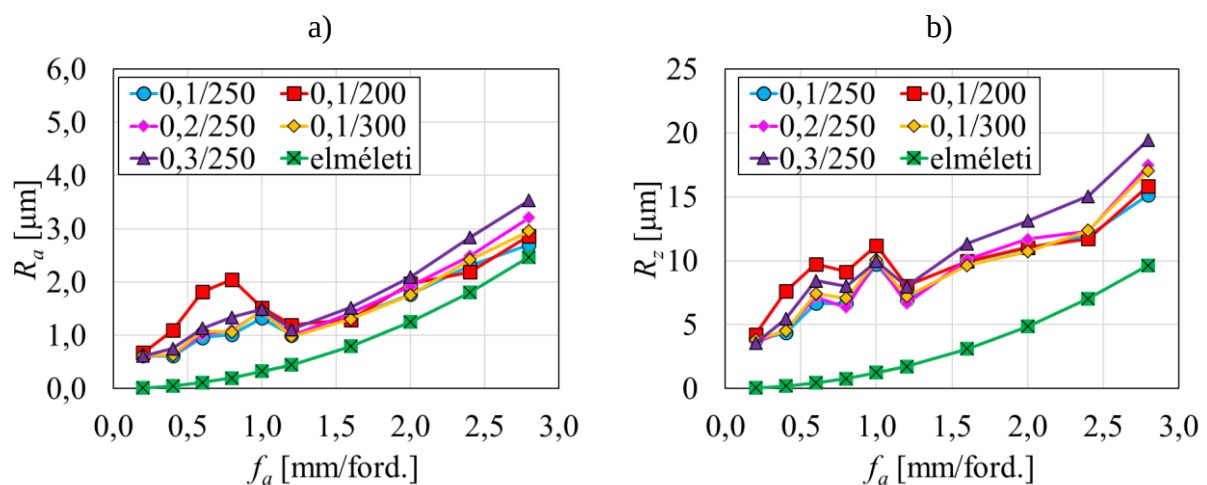
7.2.2 Az elméleti és kísérleti eredmények összehasonlítása

A következőkben szerszámok szerint megvizsgálom, hogy a különböző forgácsolósebességgel, fogásmélységgel és előtolással végrehajtott kísérleteknél hogyan viszonyulnak egymáshoz a mérési eredmények és a 6.1. fejezetben meghatározott egyenletekkel számított értékek. Az M.4. melléklet tartalmazza a mért érdességi görbéket, valamint a matematikai modellel meghatározott elméleti felületeket minden szerszámra különböző előtolásokon egy fogásmélység és forgácsolósebesség esetére.

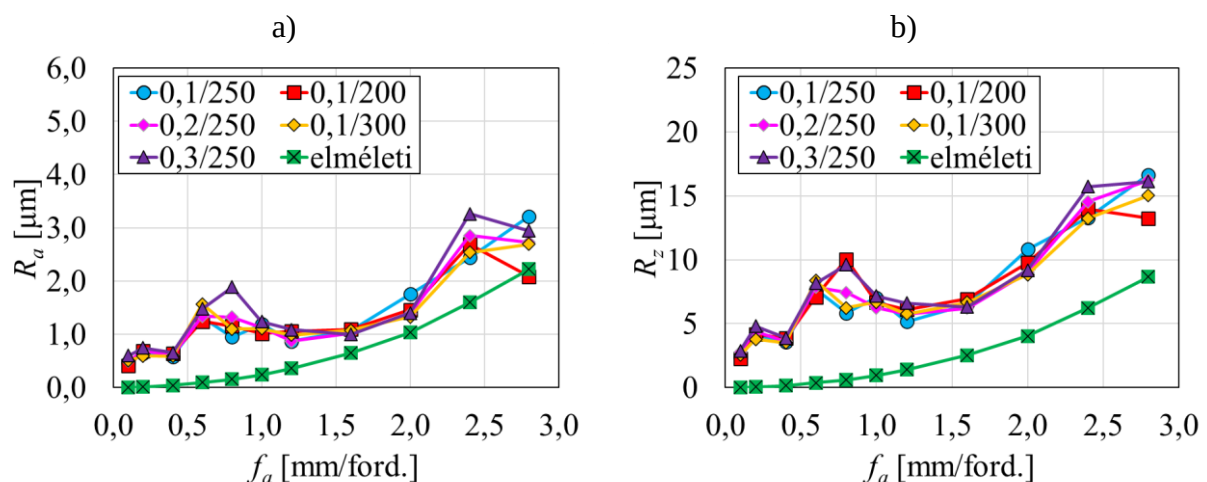
Az $R13$ szerszám esetén ábrázoltam a vizsgált érdességi paramétereket a 7.15. ábrán. A kísérleti értékek különböző fogásmélység és forgácsolósebesség esetén is közel egyformák. 1,0 mm/ford. előtolásnál lokális maximuma, 1,2 mm/ford. előtolásnál lokális minimuma van az érdességi mérőszámoknak (kivéve az $a_p = 0,1$ mm, $v_c = 200$ m/min beállítást). Ez azt jelenti, hogy ez az érték kettéválasztja a tartományt olyan téren, hogy ettől nagyobb

előtolásoknál a szerszámgeometria, ettől kisebb előtolásoknál más tényezők (például az anyagszerkezet, élekkerekedés, élrésség stb.) befolyásolják az érdességet. Ezt láthatjuk az M.4. melléklet R_{13} szerszámmra vonatkozó részében is. A 3.2. fejezetben meghatározott forgácsolt felület az 1,2 mm/ford. előtolástól figyelhető meg a mért érdességi görbéken. A nagyobb előtolások esetén látható, hogy az előtolást kétszeresére növelve az érdességi mérőszámok 1,9-szer lesznek nagyobbak.

Az elméleti értékekkel összehasonlítva látható, hogy a mért érdesség nagyobb lesz az elméletitől. A különbség az 1,2 mm/ford. előtolástól közel állandóvá válik, mely az R_a esetén kisebb (közel 0,6 μm), az R_z esetén nagyobb lesz (hozzávetőlegesen 7 μm). A számítóképlet útján meghatározott értékek jól követik a valós érdességet és az előtolás növelésével a különbség egyre kisebb lesz.



7.15. ábra. A vizsgált érdességi paraméterek az előtolás függvényében R_{13} szerszámnál különböző fogásmélységnél és forgácsoló sebességnél (a_p [mm] / v_c [m/min])

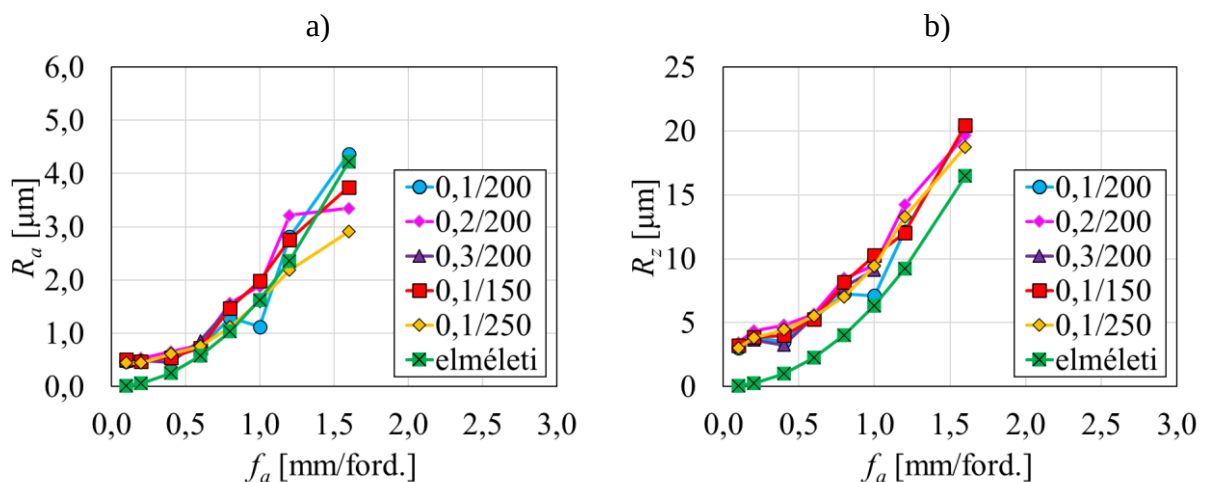


7.16. ábra. A vizsgált érdességi paraméterek az előtolás függvényében R_{15} szerszámnál különböző fogásmélységnél és forgácsoló sebességnél (a_p [mm] / v_c [m/min])

A 7.16. ábrán a 15° -os terelőszögű szerszámnál mutatom be az átlagos érdesség és az átlagos egyenetlenségmagasság értékeit. Ennél a szerszámnál is megfigyelhető a görbék lokális maximuma $0,6 - 1,0$ mm/ford. előtolások között az egyes beállítások esetén különböző f_a értékeknél. A lokális minimum ugyanakkor itt ismét $1,2$ mm/ford. előtoláshoz köthető. Az $R15$ szerszámnál $2,4$ mm/ford. és $2,8$ mm/ford. előtolás esetén figyelhető meg további eltérés a mért értékekben, a többi előtoláson közel egyforma R_a -t és R_z -t mértem. Az $f_a > 1$ mm/ford. tartományról megállapítom, hogy az előtolást kétszeresére növelve közel kétszer akkora lesz az érdességi mérőszámok értéke is. Az elméleti és a valós érdeséget összehasonlítva (7.16. ábra) az $R13$ szerszámhoz hasonlóan itt is $1,2$ mm/ford. előtolás alatt nagyobb, fölötté kisebb különbséget tapasztaltam. Nagy előtolások esetén kisebb különbséget kaptam az R_a (átlagosan $0,4 \mu\text{m}$) és R_z (átlagosan $6 \mu\text{m}$) értékekben, mint az $R13$ szerszámnál.

A 30° terelőszögű szerszámnál a 7.17. ábrán mutatom be az R_a és R_z változását az előtolás függvényében. A különböző fogásmélységgel és forgácsoló sebességgel végzett kísérletek után mért érdességi mérőszámokban mértékadó különbséget nem tapasztaltam. A mért értékekből megállapítom, hogy az $R30$ szerszámnál nem figyelhető meg kis előtolásoknál a lokális maximum, amely az $R13$ és $R15$ szerszámoknál fellépett. Ugyanakkor $0,6$ mm/ford. előtolásig kisebb meredekségűek az érdességi mérőszámokra illesztett görbék függvénye. Ennek oka, hogy ettől az előtolástól már a szerszámgeometria fogja döntően befolyásolni az érdességet, ahogy az M.4. melléklet $R30$ szerszámra vonatkozó részében is látható. $0,6$ mm/ford. előtolás fölött már nem csak az elméleti profilon, hanem a mért profilon is jól látható a hiperboloid geometriájú forgácsolt felület alapsíkbeli metszete. Az $f_a > 0,6$ mm/ford. esetén az előtolás kétszeresére növelve az R_a értéke közel 2,6-szeresére, az R_z értéke átlagosan 2,4-szeresére nő.

A kísérletek során mért és az elméleti úton meghatározott értékeket összehasonlítva megállapítom, hogy az $R30$ szerszám esetén a számított érdesség kis hibával adja meg a valós érdességet. A különbség R_a esetén átlagosan $0,2 \mu\text{m}$ (a mért értékek közel 10%-a), R_z esetén pedig $3,2 \mu\text{m}$ (a mért értékek közel 30%-a).

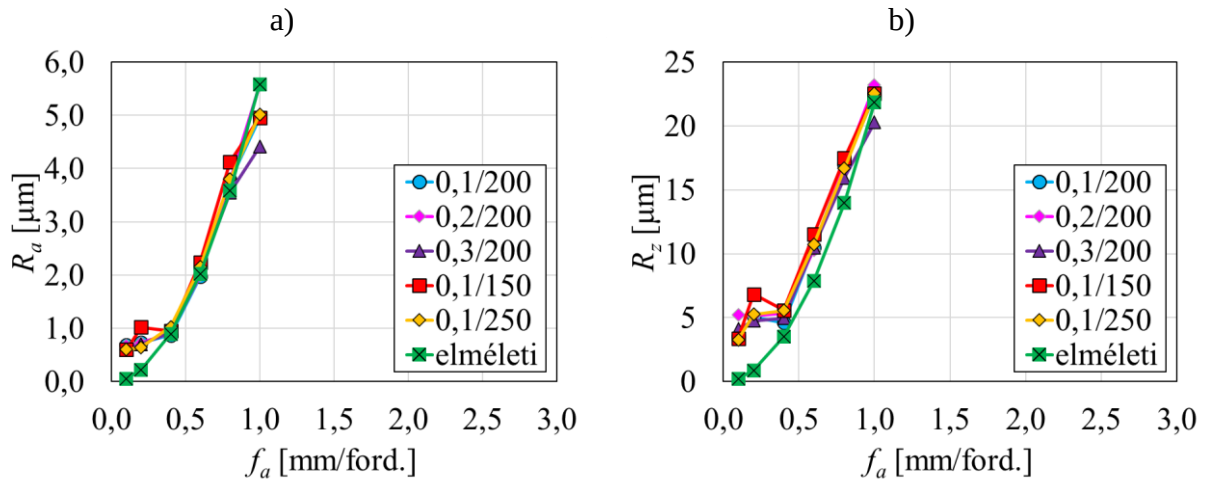


7.17. ábra. A vizsgált érdességi paraméterek az előtolás függvényében $R30$ szerszámnál különböző fogásmélységen és forgácsoló sebességnél (a_p [mm] / v_c [m/min])

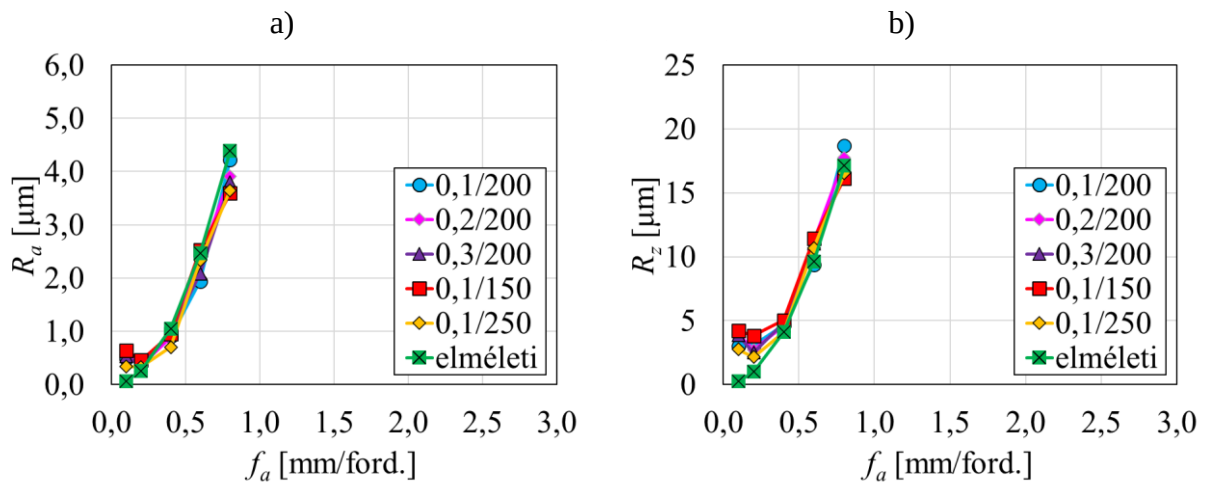
A 45° -os terelőszögű szerszámmal végzett kísérleteket követő érdességmérések eredményei és az elméleti érdesség értékei láthatóak a 7.18. ábrán. A kísérleti értékeket vizsgálva megállapítom, hogy a nagyobb λ_s esetén is közel azonos eredményeket kaptam a különböző fogásmélységek és forgácsoló sebességek esetén. Az adatokban lokális maximumot $0,2$ mm/ford. előtolásnál, lokális minimumot $0,4$ mm/ford. előtolásnál

tapasztaltam. Az $f_a \geq 0,4$ mm/ford. előtolás esetén az érdesség növekedése az előtolás függvényében közel lineáris. Az előtolás kétszeresére növelésével az R_a 4,1-szer, az R_z 3,2-szer nagyobb lesz.

Az elméleti és a kísérleti értékeket összehasonlítva megállapítom, hogy 0,4 mm/ford. előtolás fölött a kettő között szoros korreláció van. A számított és mért értékekben az R_a esetén 3%-os, az R_z esetén közel 15%-os különbség adódott.



7.18. ábra. A vizsgált érdességi paraméterek az előtolás függvényében R45 szerszámnál különböző fogásmélységen és forgácsoló sebességnél (a_p [mm] / v_c [m/min])



7.19. ábra. A vizsgált érdességi paraméterek az előtolás függvényében R50 szerszámnál különböző fogásmélységen és forgácsoló sebességnél (a_p [mm] / v_c [m/min])

Végül az R50 szerszámnál mért és számított átlagos érdesség és átlagos egyenetlenségmagasság értékeit a 7.19. ábrán mutatom be. Az R45 szerszámhoz hasonlóan 0,4 mm/ford. előtolástól közel lineárisan változnak az érdességi mérőszámok értékei, a 0,1 mm/ford. és 0,2 mm/ford. előtoláson nagyobb lesz az érdesség a többi adathoz tartozó trendhez képest. 0,4 mm/ford.-tól nagyobb előtolás esetén az f_a kétszeresére növelése az R_a értékét 4,3-szorosára, R_z értékét 3,6-szorosára növeli.

Az elméleti értékek az átlagos érdességnél közel 10%-kal nagyobbak, az átlagos egyenetlenségmagasságnál közel 10%-kal kisebbek a mért értékektől.

7.2.3 Az elméleti érdesség korrigált számítóképlete

Az előző fejezetben a mért és számított érdességi jellemzők összehasonlításából két következtetés vonható le. Először is az előtolás növelésével a felületi topográfiában hangsúlyossá válik a szerszámgeometria hatása rotációs esztergálásnál is, kis előtolásoknál az egyéb tényezők (szövetszerkezet, éllekerekedés, élérdesség, stb.) jobban befolyásolják az érdesség értékeit [32]. A kísérleti eredményekből meghatározok egy előtolás értéket ($f_{a,h}$), amely fölött a szerszámgeometria szignifikánssá válik. Másrészt az 6.1. fejezetben meghatározott számító egyenletek által számított és a mérési eredmények különbsége függ a csavarvonalú él emelkedési szögének nagyságától. Ezeket a 7.2.2. fejezet elemzése alapján levont következtetéseket a 7.1. táblázatban foglalom össze.

7.1. táblázat. A kísérletek során használt szerszámok fő jellemzői

Szerszám		<i>R13</i>	<i>R15</i>	<i>R30</i>	<i>R45</i>	<i>R50</i>
Az előtolás kétszerezésének hatása [-]	<i>R_a</i>	1,9	2	2,6	4,1	4,3
	<i>R_z</i>	1,9	2	2,4	3,2	3,6
Átlagos eltérés a mért és számított értékek között [%]	<i>R_a</i>	35	35	10	3	-10
	<i>R_z</i>	55	55	30	15	10
Szerszámgeometria szignifikánssá válása [mm/ford.]	<i>f_{a,h}</i>	1,2	1,2	0,6	0,4	0,4

A terelőszög növelésével csökken az elméleti és a valós érdességi mérőszámok közötti különbség, és csökken a szerszámgeometria érdesség szempontjából hangsúlyossá válásához szükséges előtolás is. Tehát az 6.1. fejezetben meghatározott elméleti értékek számítására szolgáló egyenleteket a fenti tényezőkkel korrigálni szükséges.

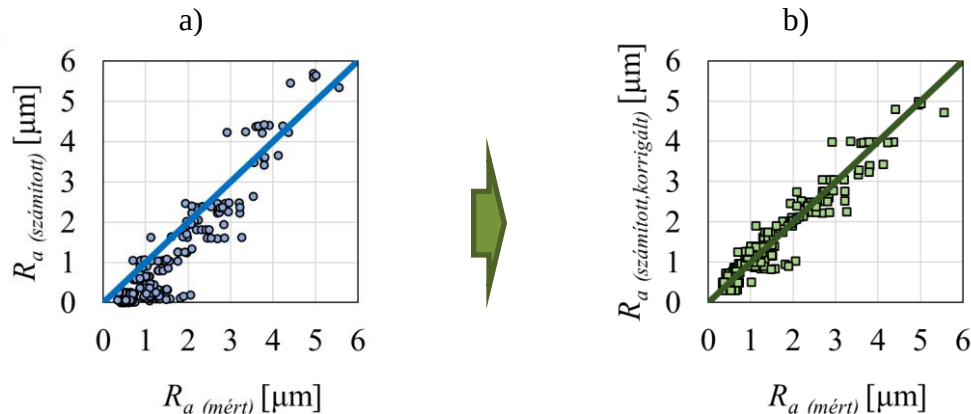
Az elméleti értékeket tapasztalati képlet alkalmazásával korrigálom. A terelőszög és az előtolás hatása a 7.1. egyenlet szerint kerül figyelembevételre. Az átlagos érdesség és az átlagos egyenetlenségmagasság korrigálásához külön határozom meg az egyenletben szereplő állandókat az M.3. mellékletben található kísérleti és elméleti eredmények alapján határozom meg numerikus analízis segítségével. A kiértékelés eredményeként a konstansok meghatározott értékeit a 7.2. táblázat tartalmazza az R_a és az R_z számított eredményeinek korrigálásához.

Az átlagos érdesség és az átlagos egyenetlenségmagasság mért és a számított értékeinek viszonyát mutatja a 7.20. és 7.21. ábra. A bal oldali ábrák a matematikai analitikai számítás útján (6.1. fejezet), a jobb oldali grafikonok a mérési eredmények figyelembevételével meghatározott tapasztalati képlettel (7.1. egyenlet) számított elméleti értékeket hasonlítják össze a kísérleti eredményekkel. A számított és a valós értékek illeszkedése akkor tökéletes, ha az ábrázolt pontok a 45°-os egyenesre illeszkednek.

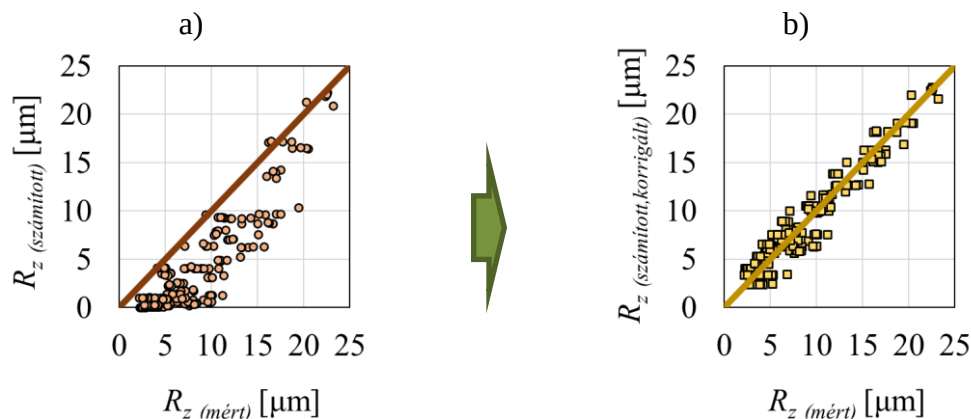
$$R_{i \text{ (korrigált)}} = A \cdot \lambda_s^B \cdot f_a^C + R_{i \text{ (számított)}}^D \quad (i = a, z) \quad (7.1)$$

7.2. táblázat. Az érdességi mérőszámok számítóképleteinek korrekciós tényezői

	A	B	C	D
$R_a \text{ (korrigált)}$	11,371354	-1,021379	-0,007731	0,895983
$R_z \text{ (korrigált)}$	25,766939	-0,541172	0,171278	0,957091



7.20. ábra. Az átlagos érdesség mért és a számított értékeinek viszonya az alapegyenlet és a korrigált egyenlet alkalmazása esetén



7.21. ábra. Az átlagos egyenetlenségmagasság mért és a számított értékeinek viszonya az alapegyenlet és a korrigált egyenlet alkalmazása esetén

A 7.20. a) és 7.21. a) ábra alapján látható, hogy a koordináta geometria módon meghatározott elméleti értékek a kis érdességek esetén jobban eltérnek, mint a nagyobb értékek esetén. Az R_z esetén nagyobb eltérés figyelhető meg, mint az R_a esetén. Az R^2 determinációs együttható R_a esetén 0,8791, R_z esetén 0,8087 (ahol 1 jelenti a tökéletes egybeesést). Ezen értékekből is látszik, hogy az átlagos egyenetlenségmagasságban tapasztalható eltérés az M.4 mellékletben látható profilok alapján magyarázható. Az elméleti profilon látható érdességsúcsokat egyrészt forgácsolás közben a mellékél, másrészt a nagy terelőszög miatt a munkadarab felületén bekövetkező másodlagos képlékeny alakváltozás csökkentti. Az átlagos érdesség szempontjából kevésbé fejtenek ki hatást ezek a jelenségek.

A 7.20. b) és 7.21. b) ábrákon látható, hogy a 7.1. egyenlet szerint korrigált, számított érdességek jól közelítik a mért értékeket. Az összehasonlító diagramon meghatározott pontok kis szóródással a 45°-os egyenesre esnek. Az R^2 determinációs együttható értéke a korrigált egyenletek esetén R_a esetén 0,9191, R_z esetén 0,9224.

7.3 Kísérleti eredmények összefoglalása

A forgácsolási kísérletek során a rotációs esztergálással végzett megmunkálásnál vizsgáltam a forgácsoló erő és a megmunkált felület érdességének változását különböző szerszámgeometriák esetében, valamint összehasonlítást végeztem a hosszeltolású esztergálással.

A kiértékelés során a főforgácsolóerő, az előtolás irányú erő és a tengelysíkban ható erő maximális és fajlagos értékeit elemeztem, valamint meghatároztam egymáshoz viszonyított arányukat. A Bekezdési szakasz során kiszámítottam és kiértékeltem az erőkomponensek idő szerinti változásának mértékét, amellyel a dinamikus hatásokat jellemeztem.

Összehasonlítottam a különböző szerszámgeometriák, valamint a kör- illetve hosszeltolású esztergálás érdességmérésének eredményeit. Megvizsgáltam a rotációs esztergálás kísérleti és elméleti érdességi mérőszámainak korrelációját.

A kísérleti eredmények alapján tett fontosabb megállapítások:

- Körelőtolás alkalmazásával és a szerszámgeometria helyes megválasztásával a tengelysíkban ható passzív erő közel felére csökkenthető a hosszeltolásos változathoz képest.
- Rotációs esztergálással hatékonyan csökkenthető a szerszámot érő dinamikus terhelés hosszeltolásos esztergáláshoz képest.
- A hosszeltolásos esztergáláshoz képest ugyanakkora előtolás mellett közel egyötöde lesz a felületi érdesség mérőszámainak értéke.
- Az átlagos érdeség és egyenetlenség-magasság összefüggései jól követik a mérési eredményeket. A számított és a mért érdességi mérőszámok között tapasztalati képletet határoztam meg, amely figyelembe veszi a körelőtolású szerszám terelőszögét is.

8 ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK, TÉZISEK

A rotációs esztergálás a körrelőtolás viszonylag újszerű alkalmazását valósítja meg. A kutatómunkám az eddig feltáratlan, illetve kellő mélységgel eddig nem kidolgozott, a célkitűzésekben megfogalmazott kérdések megválaszolását oldotta meg. Az ezekből levonható fontosabb következtetéseket az alábbi tézisekben foglaltam össze.

8.1 Tézisek

- T1. A konstruktív szerszámgeometriai modellalkotásra alapozva feltártam a rotációs esztergálás általános korrelációit és kidolgoztam az eljárás matematikai-analitikai modelljét a különböző kinematikai és geometriai jellemzők függvényében (*párhuzamos munkadarab- és szerszámtengely, kör és axiális előtolás alkalmazása, állandó emelkedésű és sugarú csavarvonalú szerszámmal esetére*). A modell segítségével meghatároztam a forgácsolt felület kétparaméteres egyenletrendszerét.
- T2. Megadtam a forgács szélesség, az ekvivalens forgácsvastagság, a szerszám szögelfordulás, a tengelyirányú munkaút, a gépi főidő, a felületképzési sebesség és az anyagleválasztási ráta számítására alkalmas matematikai összefüggéseket a kinematikai és geometriai paraméterek függvényében a rotációs esztergálást jellemző három szakaszára. Ezen összefüggésekkel elemeztem a technológiai és geometriai adatok függvényében az elméleti értékek változását (*vizsgálati tartomány: $n_m = 800 - 2400$ ford./min, $n_s = 1 - 3$ ford./min, $v_{s,a} = 0 - 8$ mm/s, $d_m = 20 - 60$ mm, $r_s = 20 - 60$ mm, $\lambda_s = 15 - 45^\circ$*).
- T3. Összeállítottam a rotációs esztergálásnál ébredő erők mérésére alkalmas mérőrendszert. A kísérleti vizsgálatok alapján megállapítottam, hogy a rotációs esztergálás alkalmazásával a hosszelőtöléses esztergáláshoz képest $\lambda_s = 30^\circ$ szerszám esetén közel 50%-ára, $\lambda_s = 45^\circ$ szerszám esetén közel 40%-ára, $\lambda_s = 50^\circ$ szerszám esetén közel 35%-ára csökkenthető a szerszám és a munkadarab között ébredő radiális (ún. passzív) erő és ezen geometriáknál 15%-ára csökkenthető a fogásvétel során a szerszámmal érő dinamikus terhelés (*vizsgálati feltételek: nemesített C45 acél anyagminőség, $f_a = 0,1 - 2,8$ mm/ford., $a_p = 0,1 - 0,3$ mm, $v_c = 150 - 300$ m/min; $\lambda_s = 13,45 - 50^\circ$*).
- T4. A rotációs esztergálásra kidolgozott modell segítségével meghatároztam a szerszámalapsíkban az elméleti érdességi profilt, és megadtam az egyenetlenségmagasság, az átlagos érdesség és a sodratosság elméleti értékeinek meghatározására alkalmas összefüggéseket. Elemeztem a megmunkálást jellemző

paraméterek hatását az egyenetlenség-magasság és az átlagos érdesség elméleti értékeire és megállapítottam, hogy R_a és R_z elméleti értékének felére csökkentéséhez – a vizsgált paramétereket egyenként változtatva – a szerszámfordulatszámot 29%-kal, a szerszámsugarát 35%-kal, a kiegészítő előtolást 87%-kal kell csökkenteni, míg a munkadarabfordulatszámot 40%-kal kell növelni (*vizsgálati tartomány: $n_m = 800 - 2400$ ford./min, $n_s = 1 - 3$ ford./min, $v_{s,a} = 0 - 8$ mm/s, $d_m = 20 - 60$ mm, $r_s = 20 - 60$ mm, $\lambda_s = 15 - 45^\circ$).*

- T5. Kísérletekkel igazoltam, hogy rotációs esztergálással megmunkált felület átlagos érdessége és átlagos egyenetlenségmagassága (rögzített előtolás mellett) a terelőszög függvényében kisebb lesz a hosszelőtolásos esztergáláshoz képest, a vizsgálati feltételek mellett 2,5 – 5,5-ször. Azonos érdességű felület 2 – 6-szor nagyobb tengelyirányú előtolás mellett is elérhető körelőtolással (*vizsgálati feltételek: nemesített C45 acél anyagminőség, $f_a = 0,1 - 2,8$ mm/ford., $a_p = 0,1 - 0,3$ mm, $v_c = 150 - 300$ m/min; $\lambda_s = 13,45 - 50^\circ$).*
- T6. Feltártam az összefüggést az átlagos érdesség és az egyenetlenség-magasság elméleti és a valós értékei között hatványkitevős alakban, paraméteres formában rotációs esztergálás esetére és meghatároztam az összefüggés paramétereinek értékeit a vizsgált tartományban (*vizsgálati feltételek: nemesített C45 acél anyagminőség, $f_a = 0,1 - 2,8$ mm/ford., $a_p = 0,1 - 0,3$ mm, $v_c = 150 - 300$ m/min; $\lambda_s = 13,45 - 50^\circ$).*

8.2 A hasznosítás és a továbbfejlesztés lehetőségei

A megoldás a rotációs esztergálás vizsgálatára és ipari célokra is alkalmas. A kutatómunka ipari környezetben való hasznosítási lehetőségei közül kiemelem, hogy az elért eredmények lehetővé teszik rotációs esztergálásnál a megmunkált felület elméleti érdességi értékeinek, a forgácskeresztmetszet geometriai jellemzőinek, a gépi főidő, anyagleválasztási ráta és felületképzési sebesség pontos meghatározását. Az eljáráshoz kapcsolódó szakirodalomban az alkalmazott egyszerűsítések nem tették lehetővé a szerszámgyártás és a technológiai feltételek olyan fejlesztését, amelyek alapján a rotációs esztergálás nyújtotta előnyök kihasználhatóak lettek volna, illetve a létrehozott megoldások további hatékonyságnövelése biztosítható lett volna. A kidolgozott összefüggések lehetővé teszik a szerszámgeometria fejlesztését és optimális kialakítását. A forgácsolóerő komponenseinek kívánt aránya elérhető. Az értekezésben bemutatott elemzések alapján az egyes paraméterek változtatásának komplex hatása határozható meg.

A közölt megoldásokkal és vizsgálati eredményekkel bizonyítottam, hogy tengelyszerű alkatrészek megmunkálásának hatékonysága növelhető a passzív erő csökkentésével elérhető (geometriai) pontosság javításával, továbbá a növelt előtolással is biztosítható kedvező érdességi értékek létrehozása. Az eljárás nehezen megmunkálható anyagok megmunkálására is javasolható.

A disszertációm eredményei több irányban is továbbfejleszthetők. A matematikai modellt továbbfejlesztve alkalmassá tehető kúpos- és homlokfelületek rotációs esztergálással való megmunkálásának vizsgálatára, továbbá a forgácsleválasztás folyamatát meghatározó jellemzők elemzésére.

ÖSSZEFOGLALÁS

A doktori értekezésemben a rotációs esztergálás elméleti és kísérleti vizsgálatát végeztem el. Ebbe a csoportba tartozó megmunkáló eljárások közül az alkatrészek gyártásának befejező műveleteiben alkalmazottakat kíséri különös figyelem és kiemelt fejlesztés, mivel ezek határozzák meg döntő mértékben az előállított alkatrész felületi minőségét, ezáltal az élettartamát is. Továbbá fontos az eljárások hatékonyságának növelése és alkalmazhatóságának kiterjesztése a termelékenység növeléséhez és a gyártási láncok csökkentéséhez. Ezek a célok a napjainkban elterjedtől eltérő kinematikai vagy geometriai viszonyokat megvalósító eljárásváltozatok fejlesztésével és gyártási környezetbe való implementálásával is elérhetőek. A nagyteljesítményű esztergáló eljárások közül a körelőtolással végzett esztergálás fejlesztése fontos a nagy termelékenység, jó felületi érdesség és a kedvező forgácsolási viszonyok miatt.

Az első kutatási lépéseként az eljárás geometriai és kinematikai feltételrendszeréből kiindulva meghatároztam az eljárást leíró matematikai-analitikai modellt. Megállapítottam a szükséges koordináta-rendszereket és a közöttük kapcsolatot teremtő transzformációs egyenleteket. Definiáltam a forgácsolt felület kétparaméteres egyenletrendszerét és az alapsíkbeli metszetének egyváltozós függvényét.

Az anyagleválasztási folyamatot vizsgálva 3 szakaszt különítettem el a forgácskeresztmetszet változása szempontjából. Meghatároztam a forgács szélesség és a vastagság összefüggéseit a Bekezdési, Állandósult és a Befejező szakaszban. Elemeztem a geometriai és kinematikai paraméterek hatását a forgácsjellemzőkre.

A harmadik fázisban a forgácsleválasztás hatékonyságát vizsgáltam. A kinematikai modell segítségével meghatároztam a szerszám szögelfordulását, a felületképző pont axiális elmozdulását és a főidőt a 3 forgácsolási szakaszra. Megadtam a főidő, felületképzési sebesség és anyagleválasztási ráta összefüggéseit. Vizsgáltam az eljárást jellemző paraméterek hatását a hatékonyság ezen jellemzőire.

A következő lépésben a megmunkált felület topográfiájának elméleti vizsgálatát végeztem el. A matematikai-analitikai modell segítségével meghatároztam az egyenetlenség-magasság, az átlagos érdesség és a sodratossági paraméterek elméleti értékeinek számítási módját. Elemeztem a megmunkált felület profilját a geometriai és a kinematikai jellemzők függvényében.

A kísérleti munkámban a forgácsoló erőt és a felületi érdességet vizsgáltam. Mérőrendszert dolgoztam ki és valósítottam meg a forgácsoló erő mérésére rotációs esztergálás során. Következtetéseimet a 11 különböző előtoláson, 3-féle forgácsoló sebességgel, 3-féle fogásmélységgel és 5-féle szerszámgeometriával végzett kísérleteim eredményim alapján dolgoztam ki. Vizsgáltam a forgácsoló erő időbeli lefolyását, az erőkomponensek változását, a fajlagos forgácsolóerőket és a szerszámot érő dinamikus terhelést. Az átlagos érdesség és egyenetlenség-magasság kísérleti vizsgálataim túl az elméleti és a valós értékek viszonyát elemeztem, meghatároztam a közöttük kapcsolatot teremtő összefüggést.

Kutatómunkám eredményeként az ipari gyakorlatban alkalmazandó és a technológiai tervezéshez nélkülözhetetlen összefüggéseket és következtetéseket határoztam meg.

SUMMARY

The theoretical and experimental analysis of rotational turning was carried out in my thesis. Special attention and priority development are paid on those machining procedure, which are applied in the last operations of the manufacturing of parts, because these decisively affect the quality and lifetime of produced components. Furthermore, it is important to enhance the effectiveness and applicability of the procedures to increase the productivity and decrease the manufacturing chains. These goals can be achieved by the development and implementation into industrial environments of procedure variants, which use untraditional kinematic and geometric relations. The research on the turning procedure with circular feed is important from the high-performance turning procedures due to the high productivity, good surface quality and favourable cutting conditions.

In the first research step I determined on kinematic basis the mathematical-analytical model describing the procedure. The necessary coordinate-systems and the transformational equations connecting them are set. The two-parametric system of equations of the cut surface and the single-variable equation of its intersection with the reference plane were defined.

During the analysis of the material removal process three phases were differentiated in the point of view of the alteration of the chip cross-sectional area. I determined the formulas of the chip width and chip height in the run-in, constant and run-out phases. The effect of the geometric and kinematic parameters on the chip attributes were analysed.

The efficiency of the chip removal was studied in the third research step. Based on the kinematic model I determined the angular rotation of the tool, the axial translation of the surface generating point and the machining time in the three phases. The formulas of machining time, surface rate and material removal rate were determined. The effect of the defining parameters of the procedure on these attributes of the efficiency was analysed.

I carried out the theoretical analysis of the machined surface topography in the next step. The equations of the average maximum height of profile, arithmetical mean height and some twist parameters were determined based on the mathematical-analytical model. I studied the machined surface profile as function of the geometrical and kinematical parameters.

The cutting forces and surface roughness were analysed during the experimental work. I worked out and implemented a measuring system for the cutting force measurement in rotational turning. My conclusions are based on the result of my experiments with 11 different feeds, 3 kinds of cutting speeds, 3 kind of depth of cuts and 5 different tool geometries. The time course of the cutting force, the alteration of the force components, the specific cutting forces and the dynamic load on the cutting tool were studied. Beyond the experimental analysis of the total height of profile and arithmetical mean height, the relations between the theoretical and experimental values of these roughness parameters were evaluated and I determined the correlation between these.

As the outcome of my thesis, I determined equations and conclusion which can be applied in the industrial practise and necessary for the process planning of rotational turning.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] G. Byrne, D. Dornfeld and B. Denkena, "Advancing cutting technology," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 52, no. 2, pp. 483-507, 2003.
- [2] L. Fridrik, S. Nagy, S. Vékony and L. Orosz, *Alkatrészgyártás és szerelés I. (Alkatrészgyártás)*, Budapest: Tankönyvkiadó Vállalat, 1979.
- [3] H. K. Tönshoff, *Massivumformteile wirtschaftlich spanen*, Hagen: Infostelle Industrieverband Massivumformung e.V., 2010.
- [4] A. Bruzzone, H. Costa, P. Lonardo and D. Lucca, "Advances in engineered surfaces for functional performance," *CIRP Annals*, vol. 57, no. 2, pp. 750-769, 2008.
- [5] B. Denkena and H. K. Tönshoff, *Spanen*, Berlin: Springer-Verlag, 2011.
- [6] DIN 8580:2003-09, *Manufacturing processes - Terms and definitions, division*, 2003.
- [7] DIN 8589-0:2003-09, *Manufacturing processes chip removal - Part 0: General; Classification, subdivision, terms and definitions*, 2003.
- [8] L. Petruschke, M. Burkhardt, T. Kohne, P. Schraml, M. Helfert and E. Abele, "Method to identify energy efficiency potentials of metal cutting machine tools in industry," *Procedia CIRP*, vol. 90, pp. 522-521, 2020.
- [9] A. M. Khan, N. He, L. Li, W. Zhao and M. Jamil, "Analysis of Productivity and Machining Efficiency in Sustainable Machining of Titanium Alloy," *Procedia Manufacturing*, vol. 43, pp. 111-118, 2020.
- [10] B. Denkena, E. Abele, C. Brecher, M.-A. Dittrich, S. Kara and M. Mori, "Energy efficient machine tools," *CIRP Annals*, vol. 69, no. 2, pp. 646-667, 2020.
- [11] R. Rentsch and B. Karpuschewski, "Energy and Resource efficiency analysis of manufacturing chains by modular process models and simulation," *Procedia Manufacturing*, vol. 43, pp. 159-166, 2020.
- [12] A. Hernandez, T. Beno, J. Repo and A. Wretland, "Analysis of Tool Utilization from Material Removal Rate Perspective," *Procedia CIRP*, vol. 29, pp. 109-113, 2015.
- [13] J. Corbett, P. A. McKeown, G. N. Peggs and R. Whatmore, "Nanotechnology: international developments and emerging products," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 49, no. 2, pp. 523-545., 2000.
- [14] M. Weck, A. Feinauer and N. Hennes, "Werkzeugmaschinen für die Produktion von morgen im Spannungsfeld - flexibel und einfach, schnell und genau," in *Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik : Aachener Perspektiven*, Aachen, Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium, 2002, pp. 373-409.
- [15] B. Wang, Z. Liu, Y. Cai, X. Luo, H. Ma, Q. Song and Z. Xiong, "Advancements in material removal mechanism and surface integrity of high speed metal cutting: A review," *Int. Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 166, 2021 (megjelenés alatt).
- [16] G. Skordaris, K. Bouzakis, F. Stergioudi, S. Kouparanis, A. Boumpakis and A. Bouzakis, "Cutting performance improvement of MTCVD coated cemented carbide inserts via appropriate heat treatment," *CIRP Annals*, vol. 69, no. 1, pp. 45-48, 2020.

- [17] M. Simon, "Experimental Research Regarding Rigidity Improvement of Hollow Machine Tools Structures Using Aluminum Foam," *Procedia Tech.*, vol. 19, pp. 228-232, 2015.
- [18] V. D. Kamble and A. Tom Mathew, "Brief review of methodologies for creation of cohesive fixture design," *Materials Today: Proc.*, vol. 22, no. 4, pp. 3353-3363, 2020.
- [19] F. Zhenglong and T. Obikawa, "Influence of cutting fluid flow on tool wear in high-pressure coolant turning using a novel internally cooled insert," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 56, no. A, pp. 1114-1125, 2020.
- [20] D. Borysenko, B. Karpuschewski, F. Welzel, J. Kundrák and C. Felhő, "Influence of cutting ratio and tool macro geometry on process characteristics and workpiece conditions in face milling," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 24, pp. 1-5, 2019.
- [21] J. Kundrák, I. Sztankovics and M. Gévai, "Comparative Analysis of CBN Cutting Inserts with Different Edge Geometries," *Cutting & Tool in Tech. Systems*, vol. 91, pp. 97-105, 2019.
- [22] J. Zhu, H. Zhou, C. Wang, L. Zhou, S. Yuan and W. Zhang, "A review of topology optimization for additive manufacturing: Status and challenges," *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 34, no. 1, pp. 91-110, 2021.
- [23] F. Klocke, E. Brinksmeier and K. Weinert, "Capability Profile of Hard Cutting and Grinding Processes," *CIRP Annals*, vol. 54, no. 2, pp. 22-45, 2005.
- [24] W. R. DeVries, *Analysis of Material Removal Processes*, NY: Springer-Verlag, 1992.
- [25] K. Herfurth, L. Kiesewetter, J. Ladwig, G. Mauer, W. Reuter, G. Seliger, K. Siegert, H. K. Tönshoff, S. G., H.-J. Warnecke and W. M., "Manufacturing Processes," in *Dubbel Handbook of Mechanical Engineering*, London, Springer, 1994.
- [26] J. T. Black and R. A. Kohser, *DeGarmo's Materials and Processes in Manufacturing - 10th edition*, John Wiley & Sons, Inc, 2007.
- [27] W. Grzesik, K. Żak and P. Kiszka, "Comparison of Surface Textures Generated in Hard Turning and Grinding Operations," *Procedia CIRP*, vol. 13, pp. 84-89, 2014.
- [28] E. M. Trent és P. K. Wright, *Metal Cutting (4. Ed.)*, Butterworth-Heinemann, 2000.
- [29] K. Kumar, D. Zindani és J. P. Davim, *Advanced Machining and Manufacturing Processes*, Cham, Switzerland: Springer International Publishing AG, 2018.
- [30] B. Carlsson, "The development and use of machine tools in historical perspective," *Journal of Economic Behavior & Organization*, vol. 5, no. 1, pp. 91-114, 1984.
- [31] A. I. Monaca, J. W. Murray, Z. Liao, A. Speidel, J. A. Robles-Linares, D. A. Axinte, M. C. Hardy and A. T. Clare, "Surface integrity in metal machining - Part II: Functional performance," *Int. Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 164, 2021 (megjelenés alatt).
- [32] M. C. Shaw, *Metal Cutting Principles - Oxford Series on Advanced Manufacturing*, New York (USA): Oxford University Press, 2005.
- [33] H. Tschätsch and J. Dietrich, *Praxis der Zerspantechnik: Verfahren, Werkzeuge, Berechnung*, Springer DE, 2008.
- [34] M. Aramesh, M. H. Attia, H. Kishawy and M. Balazinski, "Estimating the remaining useful tool life of worn tools under different cutting parameters: A survival life analysis during turning of titanium metal matrix composites (Ti-MMCs)," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 12, pp. 35-43, 2016.
- [35] A. Siller, A. Steininger and F. Bleicher, "Heat Dissipation in Turning Operations by Means of Internal Cooling," *Procedia Engineering*, vol. 100, pp. 1116-1123, 2015.

- [36] R. A. Waikar and Y. B. Guo, "A comprehensive characterization of 3D surface topography induced by hard turning versus grinding," *Journal of materials processing technology*, vol. 197, no. 1, pp. 189-199, 2008.
- [37] R. Day, *Machining Technology Developments*, Loughborough University: Loughborough, 2001.
- [38] L. L. d. Lacalle and A. Lamikiz, *Machine Tools for High Performance Machining*, London: Springer, 2009.
- [39] T. Moriwaki, "Multi-functional machine tool," *CIRP Annals*, vol. 57, no. 2, pp. 736-749, 2008.
- [40] EMAG, "Vertical turning is a highly productive process," EMAG GmbH & Co. KG, [Online]. Available: <https://www.emag.com/technologies/vertical-turning.html>. [Accessed 21 03 2021].
- [41] J.G. WEISSER SÖHNE GmbH & Co. KG, "Vertical turning," [Online]. Available: <https://www.weisser-web.com/en/technology/vertical-turning/>. [Accessed 21 03 2021].
- [42] Hessapp, "HISTORY - Experts in vertical turning since 1954," [Online]. Available: <https://ffg-ea.com/en/brand/hessapp/>. [Accessed 21 03 2021].
- [43] G. Bartarya and S. K. Choudhury, "State of the art in hard turning," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 53, no. 1, pp. 1-14, 2012.
- [44] W. Fernando, H. Karunathilake and J. Gamage, "Strategies to reduce energy and metalworking fluid consumption for the sustainability of turning operation: A review," *Cleaner Engineering and Technology*, vol. 3, 2021 (megjelenés alatt).
- [45] S. A. Klimenko and A. S. Manokhin, "Hard "skiving" turning," *Journal of Superhard Materials*, vol. 31, no. 1, pp. 42-54, 2009.
- [46] R. Komanduri, M. Lee and L. Raff, "The significance of normal rake in oblique machining," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 44, no. 10, pp. 1115-1124, 2004.
- [47] Y. Altintas and M. Weck, "Chatter Stability of Metal Cutting and Grinding," *CIRP Annals*, vol. 53, no. 2, pp. 619-642, 2004.
- [48] C. R. Giles, M. G. Halliday and B. J. Stone, "Some power and Geometry Characteristics of Axial Skiving," *Annals of the CIRP*, vol. 30, no. 1, pp. 83-86, 1981.
- [49] W. Chen, "Cutting forces and surface finish when machining medium hardness steel using CBN tools," *International journal of machine tools and manufacture*, vol. 40, no. 3, pp. 455-466, 2000.
- [50] L. Gribovszki, *Gépipari megmunkálások*, Budapest: Tankönyvkiadó Vállalat, 1977.
- [51] A. Hosokawa, T. Ueda, R. Onishi, R. Tanaka and T. Furumoto, "Turning of difficult-to-machine materials with actively driven rotary tool," *CIRP Annals*, vol. 59, no. 1, pp. 89-92, 2010.
- [52] M. Popov, "Prospects for the application of rotary cutting tools," *Materials Today: Proceedings*, vol. 38, no. 4, pp. 1757-1759, 2021.
- [53] P. Nieslony, G. Krolczyk, R. Chudy, S. Wojciechowski, R. Maruda, P. Biłous, M. Lipowczyk and L. Stachowiak, "Study on physical and technological effects of precise turning with self-propelled rotary tool," *Precision Eng.*, vol. 66, pp. 62-75, 2020.
- [54] R. Joch, J. Pilc, I. Daniš, M. Drbůl and S. Krajčoviech, "Analysis of surface roughness in turning process using rotating tool with chip breaker for specific shapes of automotive transmission shafts," *Transportation Research Procedia*, vol. 40, pp. 295-301, 2019.

- [55] E. J. A. Armarego, V. Karri and A. J. R. Smith, "Fundamental studies of driven and self-propelled rotary tool cutting processes—I. Theoretical investigation," *Int. Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 34, no. 6, pp. 785-801, 1994.
- [56] E. J. A. Armarego, V. Karri and A. J. R. Smith, "Fundamental studies of driven and self-propelled rotary tool cutting processes—II. Experimental investigation," *Int. Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 34, no. 6, pp. 803-815, 1994.
- [57] U. Olgun and E. Budak, "Machining of Difficult-to-Cut-Alloys Using Rotary Turning Tools," *Procedia CIRP*, vol. 8, pp. 81-86, 2013.
- [58] J. Pilc and K. Vasilko, "Development and applications of a rotating turning tool," *Manufacturing technology*, vol. 13, no. 2, pp. 226-231, 2013.
- [59] W. Ahmed, H. Hegab, H. Kishawy and A. Mohany, "Estimation of temperature in machining with self-propelled rotary tools using finite element method," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 61, pp. 100-110, 2021.
- [60] L. Schreiber and K. Trott, "Verfahren zur drallfreien spanenden Bearbeitung von rotationssymmetrischen Flächen". Patent DE19963897A1, 1999.
- [61] J. Schneider and S. L., "Mit dem Tangentialdrehen zu drallfreien Oberflächen," *Werkstatt und Betrieb*, vol. 6, pp. 40-45, 2002.
- [62] L. Fine, "Off centre turning," *International Journal of Machine Tool Design and Research*, vol. 10, no. 1, pp. 15-24, 1970.
- [63] A. Y. C. Nee and V. C. Venkatesh, "Form Accuracy of Tangentially Skived Workpieces," *CIRP Annals-Manufacturing Tech.*, vol. 34, no. 1, pp. 121-124, 1985.
- [64] T. Leichner, V. Franke, B. Sauer and J. C. Aurich, "Investigation of the tribological behavior of radial shaft rings and soft turned shafts under the influence of abrasive particles," *Production Engineering*, vol. 5, no. 5, p. 531–538, 2011.
- [65] A. Schubert, R. Zhang and P. Steinert, "Manufacturing of Twist-Free Surfaces by Hard Turning," *Procedia CIRP*, vol. 7, pp. 294-298, 2013.
- [66] EMAG, "Scroll-Free Turning from EMAG: Fast, Precise, Reliable," EMAG GmbH & Co. KG, [Online]. Available: <https://www.emag.com/technologies/scroll-free-turning.html>. [Accessed 16. február 2021.].
- [67] N. Kummer, „Method and device for machining rotationally symmetrical surfaces of a workpiece”. Szabadalom száma: DE102004026675C5, 2004.
- [68] J.G. WEISSER SÖHNE GmbH & Co. KG, "Rotational Turning," [Online]. Available: <https://www.weisser-web.com/en/technology/rotational-turning/>. [Accessed 10 03 2021].
- [69] M. T. & Engineering, "MAS innovations," [Online]. Available: <https://www.mas-tools.de/en/mas-innovationen.html#rotationsdrehenwellen>. [Accessed 10 03 2021].
- [70] F. Klocke, T. Bergs, F. Degen and P. Ganser, "Presentation of a novel cutting technology for precision machining of hardened, rotationally symmetric parts," *Production Engineering*, vol. 7, no. 2-3, pp. 177-184, 2013.
- [71] N. Kummer and B. VOGT, "Drallfreies Drehen ersetzt aufwändige Schleifprozesse," *IDR*, vol. 38, no. IV, pp. 332-335, 2004.
- [72] R. Neugebauer, R. Wertheim and C. Harzbecker, "Energy and Resources Efficiency in the Metal Cutting Industry," in *Seliger G., Khraisheh M., Jawahir I. (eds) Advances in Sustainable Manufacturing*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2011, p. 249–259.
- [73] J. Kundrák, K. Gyáni and I. Deszpoth, "Precision Hard Turning of External Cylindrical Surfaces by Rotation Procedure," *Cutting & Tool in Technological Systems*, vol. 77, pp.

- 108-117, 2011.
- [74] J. Kundrák, K. Gyáni, I. Deszpoth and S. Szabó, "Hard turning with rotational feed procedure," in *Development in Machining Technology - Scientific Research Report, Vol. 2*, Cracow, Cracow University of Technology, 2012, pp. 42-49.
 - [75] F. Degen, F. Klocke, T. Bergs and P. Ganser, "Comparison of rotational turning and hard turning regarding surface generation," *Production Eng.*, vol. 8, pp. 309-317, 2014.
 - [76] M. Šajgalík, A. Martikán, A. Czán, J. Pilc, J. Holubják and J. Mrázik, "Computing of the Theoretical Value of Roughness Parameter Rz when Turning with Helical Cutting Edge," *Technological Engineering*, vol. 13, no. 2, pp. 9-10, 2016.
 - [77] P. Martikán, A. Czán, J. Holubják, D. Varga, J. Martinček and T. Czánová, "Verification of New Method of Determining the Roughness Parameters for Rotational Turning with Non-linear Cutting Edge," *Procedia Eng.*, vol. 192, pp. 563-568, 2017.
 - [78] J. Mrázik, P. Martikán, A. Czán, J. Holubják, D. Varga, J. Martinček and T. Czánová, "Verification of New Computing Method for Determining of the Roughness Parameters for Rotational Turning with Non-Linear Cutting Edge," *Technological Engineering*, vol. 13, pp. 44-46, 2017.
 - [79] T. Olivier, *Théorie géométrique des engrenages*, Párizs, 1842.
 - [80] H. I. Gohman, *Theory of Gearing Generalized and Developed Analytically*, Odessza, 1886.
 - [81] R. S. Ball, *A Treatise on the Theory of Screws*, University of Cambridge, 1900.
 - [82] M. Distelli, "Über instantane Schraubengeschwindigkeiten und die Verzahnung der Hyperboloidräder," *Zeitschrift Math und Phys*, vol. 51, pp. 51-88, 1904.
 - [83] E. Wildhaber, „Helical Gearing”. Szabadalom száma: U.S. Patent No.1,601,750., 1926.
 - [84] J. Capelle, *Théorie et calcul des engrenages hypoïds*, Paris: Dunod, 1949.
 - [85] F. G. Altmann, "Bestimmung des Zahnflankeneingriffs bei allgemeinen Schraubgetrieben," *Forschung auf dem Gebiet des Ing.*, vol. 8, p. 209–225, 1937.
 - [86] N. I. Kolchin, *Nekotorie voproszū geometrii, kinematiki, rascseta i proizvodstva*, Leningrad, 1968.
 - [87] I. S. Krivenko, *Novie tipū cservjacsnuh peredacs na szudah*, Izd. Szudoszrovenie, Leningrád, 1967.
 - [88] F. Litvin, *A fogaskerékkapcsolás elmélete*, Budapest: Műszaki Könyvkiadó, 1972.
 - [89] B. A. Perepelica, *Otobračeniya affinnogo prostranstva v teorii formoobrazovanija poverchnostej rezaniem*, Harkov: Višča škola, 1981.
 - [90] B. A. Perepelica, *Osznovū Teoriji proektyroványija rézsusih insztrumentov*, Harkov, 1974, p. 55.
 - [91] K. Vasilko, "Kinematics analysis of the movement of cutting tool against the workpiece and creation of new schemes , pp.:", *Manufacturing and industrial engineering*, vol. 1, pp. 8-15, 2010.
 - [92] B. A. Perepelica and J. Kundrák, "How to use the multiparameter mapping to describe the kinematics of metal cutting," in *Result of the scientific cooperation between the Polytechnical University of Kharkov and the University of Miskolc : Jubilee Conference, Miskolc, 2 March, 1994, I. Páczelt, J. Kundrák, Eds.*, Miskolc, University of Miskolc, 1994, pp. 95-98.
 - [93] J. Kundrák, B. A. Perepelica and N. V. Sashkova, "Analiticheskoe opredelenie kinematicheskikh geometricheskikh parametrov pri tochenii i rastachivanii poligonnykh

- poverkhnostejj,” *Rezanie i Instrument v Tehnologiceskih S.*, vol. 37, pp. 43-47, 1987.
- [94] J. Kundrák, *Rezanie pri periodicheskikh nagruzkakh rezcami iz sverkhvtjordykh materialov* (Cutting with superhard tools under periodically changing conditions, in Russian) Monográfia, Kharkov-Miskolc, 1996.
- [95] J.-F. Hsieh, “Mathematical modeling of interrelationships among cutting angles, setting angles and working angles of single-point cutting tools,” *Applied Mathematical Modelling*, vol. 34, no. 10, pp. 2738-2748, 2010.
- [96] J.-F. Hsieh and P. D. Lin, “Application of homogenous transformation matrix to measurement of cam profiles on coordinate measuring machines,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 47, no. 10, p. 1593–1606, 2007.
- [97] B. Zhou, S. Wang, C. Fang, S. Sun and H. Dai, “Geometric error modeling and compensation for five-axis CNC gear profile grinding machine tools,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 92, p. 2639–2652, 2017.
- [98] Z. Li, J. Yang and K. Z. Y. Fan, “Integrated geometric and thermal error modeling and compensation for vertical machining centers,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 76, p. 1139–1150, 2015.
- [99] L. Szeniczai, *Csigahajtoművek*, Budapest: Műszaki Könyvkiadó, 1957.
- [100] J. Tajnafői, *Szerszámgépek mozgásleképező tulajdonságainak elvei és néhány alkalmazása*, Kandidátusi értekezés, Miskolc, 1965.
- [101] I. Lévai, *Kitérő tengelyek közt változó mozgásátvitelt megvalósító – egyenesélű szerszámmal lefejthető – fogazott kerek*, Kandidátusi értekezés, Budapest, 1966.
- [102] J. Drobni, *Köszörülhető globoid csigahajtások*, Kandidátusi értekezés, Budapest, 1968.
- [103] I. Siposs, *Globoid hajtások lefejtés nélkül készített csigakerékkel*. Kandidátusi értekezés, Budapest, 1990.
- [104] I. Drahos, *A kinematikai gyártásgeometria alapjai*, Akadémiai doktori értekezés, Budapest, 1987.
- [105] T. Bercsey, *Globoid csiga és sík fogfelületű hengeres kerék kapcsolódási viszonyainak*, Egyetemi doktori értekezés, Budapest, 1971.
- [106] T. Bercsey, *Toroidhajtások elmélete*, Kandidátusi értekezés, Budapest, 1977.
- [107] I. Dudás, *Ívelt profilú csigahajtások szerszámozásának és gyártásának fejlesztése*, Kandidátusi értekezés, Miskolc, 1980.
- [108] I. Dudás, *Csavarfelületek gyártásának elmélete*, Akadémiai doktori d., Miskolc, 1991.
- [109] I. Dudás, *The theory and practice of worm gear drives*, Butterworth-Heinemann, 2005.
- [110] I. Dudás, “The extention of the general mathematical model developed for helicodical surfaces to the whole system of manufacturing technology and production geometry (ProMAT),” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 82, no. 1-4, pp. 5-8, 2016.
- [111] K. Bánya, *Hengeres csigák gyártásgeometriája és ellenőrzése*, Egyetemi doktori értekezés, Miskolc, 1977.
- [112] V. Csibi, *Contribution to Numerical Generation of Helical Gearing with any Profils* (in Romanian), Ph.D. disszertáció, Technical University of Cluj-Napoca, 1990.
- [113] L. Dudás, *Kapcsolódó felületepárok gyártásgeometriai feladatainak megoldása az elérés modell alapján*, Kandidátusi értekezés (p. 144), Budapest, 1991.

- [114] G. Pay, Belső csigás hajtások, Ph.D. disszertáció (p. 96), Miskolci Egyetem, 2001.
- [115] M. Máté, Contribuții la optimizarea parametrilor geometrice și cinematische ai cuțitelor roată cu dinți înclinați (A Fellows típusú ferde fogú metszőkerekek geometriai és kinematikai paramétereinek optimalizálása), Ph. D. disszertáció, Brassó: Brassói „Transilvania” Egyetem, 1999.
- [116] Z. Balajti, Kinematikai hajtópárok gyártásgeometriájának fejlesztése, Ph.D. disszertáció (p. 170), Miskolc: Miskolci Egyetem, 2007.
- [117] Z. Balajti, A Monge ábrázolás bijektivitásának elméleti elemzése és alkalmazása a mérnöki gyakorlatban, Miskolc, Magyarország: Gazdász Elasztik Kft., 2015.
- [118] Z. Balajti and I. Dudás, “The Monge theorem and its application in engineering practice,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 91, p. 739–749, 2017.
- [119] G. Hegedűs, A származtatáselmélet alkalmazása és a numerikus megoldás előállítás golyós-menetes mozgásátalakító mechanizmusoknál, Ph.D. disszertáció (p. 116), Miskolc: Miskolci Egyetem, 2013.
- [120] S. Bodzás, Kúpos csiga-, tányérkerék-, és szerszám felületek kapcsolódásának elemzése, Ph.D. értekezés (p. 148), Miskolc: Miskolci Egyetem, 2014.
- [121] E. Faluvégi, Cercetări privind metodele de măsurare a parametrilor geometrice ai roților dințate (Research on methods of measuring geometric parameters of the gears), Ph.D. disszertáció (, Romania: Transilvania University of Brasov, 2012.
- [122] L. Kelemen, Fogasgyűrűs tengelykapcsoló kapcsolódási viszonyainak elemzése, Ph.D. disszertáció (p. 135), Miskolc: Miskolci Egyetem, 2016.
- [123] Sandvik Coromant, „R390-016A16L-11L CoroMill® 390,” [Online]. Available: <https://www.sandvik.coromant.com/>. [Hozzáférés dátuma: 16 február 2021].
- [124] Sandvik Coromant, „R390-032EH25-17M,” CoroMill® 390, [Online]. Available: <https://www.sandvik.coromant.com>. [Hozzáférés dátuma: 17 február 2021].
- [125] Fraisa, “P5300 Hengeres maró,” [Online]. Available: <http://www.fraisadirect.com>. [Accessed 16 február 2021].
- [126] Sandvik Coromant, „1P341-1600-XB CoroMill® Plura,” [Online]. Available: <https://www.sandvik.coromant.com>. [Hozzáférés dátuma: 16 február 2021].
- [127] Sandvik Coromant, „R215.38-20050-AC38L 1620 CoroMill®,” [Online]. Available: <https://www.sandvik.coromant.com>. [Hozzáférés dátuma: 16 február 2021].
- [128] Sandvik Coromant, “DCLNL 2525M 12 T-Max® P száras szerszám esztergáláshoz,” [Online]. Available: <https://www.sandvik.coromant.com>. [Accessed 16 február 2021].
- [129] J. Kundrák, A. P. Markopoulos, T. Makkai, I. Deszpoth and 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.
- [130] P. Benardos and G.-C. Vosniakos, “Predicting surface roughness in machining: a review,” *Int. J. of Machine Tools and Manufacture*, vol. 43, no. 8, pp. 833-844, 2003.
- [131] A. Mgherony, B. Mikó and G. Farkas, “Comparison of Surface Roughness When Turning and Milling,” *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, vol. 65, no. 4, pp. 337-344, 2021.
- [132] ISO4288:1996, *Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method — Rules and procedures for the assessment of surface texture*, 1996.

- [133] J. Kundrák, I. Deszpoth and V. Molnár, “Comparative study of material removal in hard machining of bore holes,” *Tehnički vjesnik*, vol. 21, no. 1, pp. 183-189, 2014.
- [134] C. Felhő, Investigation of surface roughness in machining by single and multi-point tools (Phd Dissertation), Shaker Verlag GmbH, 2014.
- [135] ISO4287:1997, *Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method — Terms, definitions and surface texture parameters*, 1997.
- [136] MBN 31 007-7: 2008-09, *Geometrische produktspezifikationen (GPS) -- Oberflächenbeschaffenheit -- Mess- und Auswerteverfahren zur Bewertung von drallreduzierten dynamischen Dichtflächen.*, Daimler , 2008.

Az értekezés témájában megjelent saját publikációk

- [S1] I. Sztankovics, “Rotational Turning in Precision Finishing,” *Hungarian Journal of Industry and Chemistry*, vol. 39, no. 2, pp. 309–312, 2011.
- [S2] I. Sztankovics and J. Kundrák, “Mathematical Model of Machined Surfaces in Rotational Turning and Skiving,” in *Proceedings of the Thirteenth International Conference on Tools, ICT 2012*, Miskolc, 27-28 March, 2012, J. Kundrák, Gy. Varga, I. Deszpoth, Eds. Miskolc: Bíbor Press, 2012, pp. 83–88.
- [S3] I. Sztankovics and J. Kundrák, “Experimental Investigation on Machined Surface of Aluminium Alloy During Skiving,” in *Proceedings of the XXVI. microCAD International Scientific Conference, microCAD 2012*, Miskolc, 29-30 March, 2012., P. Bikfalvi Ed. Miskolc: Miskolci Egyetem, 2012. L section: Production Engineering and Manufacturing Systems, paper 23
- [S4] I. Sztankovics and J. Kundrák, “Mathematical Description of Machining External Cylindrical Surface in Case of Rotational Turning,” *Rezanie I Instrumenty V Tekhnologicheskikh Sistemah*, vol. 82, pp. 264–269, 2012.
- [S5] J. Kundrák, K. Gyáni, I. Deszpoth, and I. Sztankovics, “Material Removal Characteristics in Rotational and Tangential Turning,” *Rezanie I Instrumenty V Tekhnologicheskikh Sistemah*, vol. 82, pp. 109–116, 2012.
- [S6] J. Kundrák, K. Gyáni, I. Deszpoth, and I. Sztankovics, “Technology planning of hard turning in case of rotational feed,” in *Proceedings of the International Conference on Innovative Technologies, IN-TECH 2012*, Rijeka, 26-28. September, 2012, Z. Car, J. Kudláček, T. Pepelnjak, Eds. Rijeka: Faculty of Engineering University of Rijeka, 2012, pp. 295–299.
- [S7] I. Sztankovics and J. Kundrák, “Maximális érdesség vizsgálata rotációs előtolású esztergálással megmunkált külső hengeres felületen,” *Multidiszciplináris Tudományok: A Miskolci Egyetem Közleménye*, vol. 2, no. 1, pp. 135–146, 2012.
- [S8] I. Sztankovics and J. Kundrák, “Theoretical Value of Total Height of Profile in Rotational Turning,” *Applied Mechanics and Materials*, vol. 309, pp. 154–161, 2013.

- [S9] I. Sztankovics, "Az átlagos érdesség elméleti értéke rotációs esztergálás esetén," in *Proceedings of the Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka XVIII., FMTÜ XVIII.*, 21-23 March, 2013, E. Bitay, Ed. Kolozsvár: EME Kiadó, 2013, pp. 391–394.
- [S10] J. Kundrák, K. Gyáni, I. Deszpoth, and I. Sztankovics, "Some Topics in Process Planning of Rotational Turning," *Engineering Review*, vol. 34, no. 1, pp. 23–32, 2014.
- [S11] J. Kundrák, I. Sztankovics, and I. Deszpoth, "Chip Removal Characteristics in Rotational Turning and the Effect of the Tool Diameter Alteration," *Academic Journal of Manufacturing Engineering*, vol. 11, no. 4, pp. 26–29, 2013.
- [S12] I. Sztankovics and J. Kundrák, "Determination of the Chip Width and the Undeformed Chip Thickness in Rotational Turning," *Key Engineering Materials*, vol. 581, pp. 131–136, 2014.
- [S13] I. Sztankovics and J. Kundrák, "Some Characteristic Parameters of The Run-In Phase in Rotational Turning and Their Determination," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 474, pp. 405–410, 2014.
- [S14] I. Sztankovics and J. Kundrák, "Effect of the Inclination Angle on the Defining Parameters of Chip Removal in Rotational Turning," *Manufacturing Technology*, vol. 14, no. 1, pp. 97–104, 2014.
- [S15] J. Kundrák, I. Sztankovics, and K. Gyáni, "Analysis of the Theoretical Values of Several Characteristic Parameters of Surface Topography in Rotational Turning," *World Academy of Science Engineering and Technology*, vol. 8, no. 5, pp. 907–912, 2014.
- [S16] I. Sztankovics and J. Kundrák, "The Characteristic Parameters of the Twist Structure on Cylindrical Surfaces Machined by Turning Procedures," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 693, pp. 418–423, 2014.
- [S17] I. Sztankovics and J. Kundrák, "Surface Rate and Material Removal Rate in Rotational Turning," in *Development in Machining Technology* vol.5, Cracow: Cracow University of Technology, 2015, pp. 50–61.
- [S18] I. Sztankovics and J. Kundrák, "A forgácsleválasztás sajátosságai rotációs esztergálás esetén," in *Publications of the MultiScience - XXIX. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference Miskolc*, 9-10 April, 2015, T. Kékesi Ed. Miskolc: Miskolci Egyetem, 2015. D1 section: Innovative mechanical engineering Technologies, paper 8
- [S19] J. Kundrák and I. Sztankovics, "Surface Roughness in Machining with Single Defined Edged Rotating Cutting Tool," in *Development in Machining Technology*, vol. 6., Cracow: Cracow University of Technology, 2016, pp. 19-28.
- [S20] I. Sztankovics and J. Kundrák, "A forgácsoló erő változása az előtolás függvényében rotációs esztergálásnál," *GÉP*, vol. 61, no. 1, pp. 43–46, 2020.
- [S21] I. Sztankovics, "Components of the Cutting Force and Their Specific Values at Different Feeds in Rotational Turning," *Rezanie I Instrumenty V Tekhnologicheskikh Sistemah*, vol. 93, no. 1, pp. 88–94, 2020.
- [S22] I. Sztankovics, "A forgácsolt felület analitikus meghatározása rotációs esztergálásnál," *Multidiszciplináris Tudományok: A Miskolci Egyetem Közleménye*, vol. 11, no. 4, pp. 102–110, 2021.

MELLÉKLETEK

M.1. Az elvégzett kísérletek technológiai adatai

	a_p [mm]	v_c [m/min]	f_a [mm/ford.]										
			0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,6	2,0	2,4	2,8
R13	0,1	200											
	0,1	250											
	0,1	300											
	0,2	250											
	0,3	250											
R15	0,1	200											
	0,1	250											
	0,1	300											
	0,2	250											
	0,3	250											
R30	0,1	150											
	0,1	200											
	0,1	250											
	0,2	200											
	0,3	200											
R45	0,1	150											
	0,1	200											
	0,1	250											
	0,2	200											
	0,3	200											
R50	0,1	200											
	0,1	250											
	0,1	300											
	0,2	250											
	0,3	250											
CNMG	0,1	200											
	0,1	250											
	0,1	300											
	0,2	250											
	0,3	250											

M.2. Az erőmérés kísérleti és elméleti eredményei

R13 SZERSZÁM

a_p [mm]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
f_a [mm/ford.]	0,2	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6	0,8
v_c [mm]	200	250	300	200	250	300	200	250	300	200
A_c [mm ²]	0,02	0,02	0,02	0,04	0,04	0,04	0,06	0,06	0,06	0,08
$F_{c,max}$ [N]	160,1	168,1	161,6	246,6	216,2	214,8	278,5	258,5	254,5	327,7
$F_{p,max}$ [N]	224,9	240,3	255,9	282,4	305,7	324,7	321,6	327,6	347,3	361
$F_{f,max}$ [N]	18,2	19,6	20,3	32	28,8	31,3	37,8	36,5	39,3	46,2
h_e [μm]	4,372	4,374	4,376	8,778	8,783	8,788	13,467	13,476	13,486	17,593
k_c [N/ mm ²]	8009,2	8409,9	8080,4	6166,6	5405,4	5372,3	4642,5	4308,8	4243,1	4097,1
k_p [N/ mm ²]	11249,8	12018,4	12799,4	7062,2	7642,9	8119,9	5360,7	5461,4	5788,6	4512,6
k_f [N/ mm ²]	910,5	981,1	1015	801,7	720,6	783,3	631,2	609,9	656,3	578
t_{be} [s]	1,113	0,886	0,735	0,558	0,445	0,369	0,32	0,255	0,211	0,294
$\Delta F_c/\Delta t$ [N/s]	0,143	0,189	0,219	0,441	0,485	0,582	0,867	1,012	1,203	1,111
$\Delta F_p/\Delta t$ [N/s]	0,202	0,271	0,347	0,505	0,686	0,879	1,002	1,283	1,641	1,224
$\Delta F_f/\Delta t$ [N/s]	0,016	0,022	0,027	0,057	0,064	0,084	0,118	0,143	0,186	0,156

a_p [mm]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
f_a [mm/ford.]	0,8	0,8	1	1	1	1,2	1,2	1,2	1,6	1,6
v_c [mm]	250	300	200	250	300	200	250	300	200	250
A_c [mm ²]	0,08	0,08	0,1	0,1	0,1	0,12	0,12	0,12	0,16	0,16
$F_{c,max}$ [N]	297,5	293,3	377,2	337,4	339,9	413,4	372,9	370	498,7	442,7
$F_{p,max}$ [N]	361,7	380	378,6	378,6	398,2	411,9	410,5	428,8	453,7	453,4
$F_{f,max}$ [N]	43	45,7	54,9	51,5	54,8	60,5	58,6	60,6	75,6	70
h_e [μm]	17,603	17,613	22,509	22,526	22,543	26,446	26,462	26,477	35,34	35,361
k_c [N/ mm ²]	3719,6	3667,3	3772,7	3374,5	3399,7	3445,4	3107,7	3083,4	3116,9	2767
k_p [N/ mm ²]	4522	4750,6	3786,1	3786,2	3982,2	3433,1	3420,8	3573,7	2836	2833,8
k_f [N/ mm ²]	537,7	571,4	549,2	515,9	548,6	504,7	488,7	505,5	472,7	437,9
t_{be} [s]	0,234	0,194	0,201	0,16	0,133	0,206	0,164	0,136	0,161	0,128
$\Delta F_c/\Delta t$ [N/s]	1,267	1,506	1,868	2,1	2,554	2,004	2,271	2,717	3,088	3,444
$\Delta F_p/\Delta t$ [N/s]	1,54	1,951	1,874	2,357	2,991	1,997	2,499	3,149	2,81	3,527
$\Delta F_f/\Delta t$ [N/s]	0,183	0,234	0,271	0,321	0,412	0,293	0,357	0,445	0,468	0,545

a_p [mm]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
f_a [mm/ford.]	1,6	2	2	2	2,4	2,4	2,4	2,8	2,8	2,8
v_c [mm]	300	200	250	300	200	250	300	200	250	300
A_c [mm ²]	0,16	0,2	0,2	0,2	0,24	0,24	0,24	0,28	0,28	0,28
$F_{c,max}$ [N]	438	511,2	493,5	489,1	629,1	555,9	543,7	695	606,4	595,9
$F_{p,max}$ [N]	470,3	469	477,1	491,4	516,4	506,7	519,8	540,5	529,5	538,3
$F_{f,max}$ [N]	72	78,8	80,8	82,1	98,8	90,9	91,2	109,1	100,6	103,4
h_e [μm]	35,382	44,305	44,332	44,36	53,294	53,328	53,363	62,333	62,375	62,416
k_c [N/ mm ²]	2737,7	2556,3	2467,7	2445,9	2621,4	2316,4	2265,5	2482,4	2165,8	2128,3
k_p [N/ mm ²]	2939,4	2345,2	2385,6	2457,3	2151,8	2111,3	2166,1	1930,5	1891,2	1922,6
k_f [N/ mm ²]	450,3	394,3	404,2	410,5	411,8	378,9	380,2	389,9	359,5	369,2
t_{be} [s]	0,106	0,133	0,106	0,088	0,115	0,091	0,075	0,101	0,08	0,067
$\Delta F_c/\Delta t$ [N/s]	4,109	3,828	4,643	5,55	5,463	6,066	7,156	6,832	7,49	8,879
$\Delta F_p/\Delta t$ [N/s]	4,412	3,512	4,488	5,576	4,485	5,529	6,842	5,313	6,54	8,021
$\Delta F_f/\Delta t$ [N/s]	0,675	0,59	0,76	0,931	0,858	0,992	1,201	1,073	1,243	1,54

a_p [mm]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
f_a [mm/ford.]	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,6	2	2,4	2,8
v_c [mm]	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250
A_c [mm ²]	0,04	0,08	0,12	0,16	0,2	0,24	0,32	0,4	0,48	0,56
$F_{c,max}$ [N]	273,3	361,6	433,2	499,6	566,7	614,3	722,7	814,2	892,2	962,5
$F_{p,max}$ [N]	335,9	435,9	464,7	515,3	534,5	566,5	606,5	633,8	663,7	677,5
$F_{f,max}$ [N]	34,9	50,1	65,6	75,3	89,4	100,3	121,5	139,3	151,4	162,5
h_e [μm]	6,222	12,495	19,186	25,045	32,074	37,652	50,32	63,092	75,902	88,786
k_c [N/mm ²]	6834	4521,2	3610,2	3122,7	2833,7	2559,7	2258,5	2035,5	1858,8	1718,8
k_p [N/mm ²]	8398,5	5449,1	3873,3	3221	2672,8	2360,5	1895,6	1584,7	1382,7	1209,9
k_f [N/mm ²]	872,8	626,7	547	470,7	447,3	417,9	379,8	348,3	315,5	290,3
t_{be} [s]	1,229	0,609	0,345	0,315	0,212	0,216	0,166	0,135	0,115	0,1
$\Delta F_c/\Delta t$ [N/s]	0,222	0,593	1,254	1,585	2,662	2,84	4,34	6,002	7,733	9,56
$\Delta F_p/\Delta t$ [N/s]	0,273	0,714	1,346	1,635	2,511	2,619	3,643	4,673	5,752	6,729
$\Delta F_f/\Delta t$ [N/s]	0,028	0,082	0,19	0,239	0,42	0,463	0,73	1,027	1,312	1,614

a_p [mm]	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
f_a [mm/ford.]	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,6	2	2,4	2,8
v_c [mm]	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250
A_c [mm ²]	0,06	0,12	0,18	0,24	0,3	0,36	0,48	0,6	0,72	0,84
$F_{c,max}$ [N]	362	474,1	598,9	694,9	788,1	868,1	1004,1	1152,7	1289,6	1344,7
$F_{p,max}$ [N]	393,7	494,3	546,2	578,6	607,8	633,5	670,9	708,1	728,8	897,8
$F_{f,max}$ [N]	49,4	67,5	90,1	107,5	126,3	141,9	166,3	194,7	215	239,5
h_e [μm]	7,666	15,879	23,869	31,894	39,956	48,057	64,199	80,406	96,682	113,03
k_c [N/mm ²]	6033,5	3951,3	3327,4	2895,6	2627	2411,4	2091,9	1921,2	1791,2	1600,9
k_p [N/mm ²]	6563,2	4119,5	3034,5	2411,1	2026,3	1759,7	1397,7	1180,2	1012,3	1068,8
k_f [N/mm ²]	823,3	562,7	500,7	448,2	421,2	394,2	346,4	324,6	298,7	285,1
t_{be} [s]	1,486	0,575	0,386	0,291	0,233	0,195	0,15	0,123	0,104	0,091
$\Delta F_c/\Delta t$ [N/s]	0,243	0,823	1,551	2,387	3,369	4,437	6,676	9,364	12,312	14,695
$\Delta F_p/\Delta t$ [N/s]	0,264	0,858	1,414	1,988	2,599	3,238	4,46	5,752	6,958	9,811
$\Delta F_f/\Delta t$ [N/s]	0,033	0,117	0,233	0,369	0,54	0,725	1,105	1,582	2,053	2,617

R15 SZERSZÁM

a_p [mm]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
f_a [mm/ford.]	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4	0,6
v_c [mm]	200	250	300	200	250	300	200	250	300	200
A_c [mm ²]	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,04	0,04	0,04	0,06
$F_{c,max}$ [N]	149,4	148,2	147,5	159,4	159,6	149,1	231,4	221	215,5	239,1
$F_{p,max}$ [N]	185,6	193	196,7	200,3	207,9	206,8	261,7	277	282,5	275,5
$F_{f,max}$ [N]	21	22,4	21,4	22,5	23,7	21,3	33,7	26,8	25,9	27,7
h_e [μm]	2,04	2,047	2,055	4,084	4,099	4,115	8,025	8,06	8,069	12,256
k_c [N/mm ²]	14948,3	14824,4	14755	7973,7	7984,9	7455,5	5785,6	5527,3	5388,3	3986,1
k_p [N/mm ²]	18560,3	19306,4	19679,3	10015,4	10396	10343,9	6543	6925,9	7064,8	4593,1
k_f [N/mm ²]	2102,6	2247,2	2147,5	1126,6	1187,5	1067,9	844,5	671,5	648,2	462,3
t_{be} [s]	1,8	1,412	1,153	0,912	0,715	0,584	0,519	0,405	0,336	0,325
$\Delta F_c/\Delta t$ [N/s]	0,083	0,104	0,127	0,174	0,223	0,255	0,445	0,544	0,641	0,734
$\Delta F_p/\Delta t$ [N/s]	0,103	0,136	0,17	0,219	0,29	0,353	0,503	0,682	0,84	0,846
$\Delta F_f/\Delta t$ [N/s]	0,011	0,015	0,018	0,024	0,033	0,036	0,065	0,066	0,077	0,085

a_p [mm]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
f_a [mm/ford.]	0,6	0,6	0,8	0,8	0,8	1	1	1	1,2	1,2
v_c [mm]	250	300	200	250	300	200	250	300	200	250
A_c [mm ²]	0,06	0,06	0,08	0,08	0,08	0,1	0,1	0,1	0,12	0,12
$F_{c,max}$ [N]	225,3	213,8	430,4	356,9	346,3	405	387,9	372,6	339,3	364
$F_{p,max}$ [N]	274,9	280,2	450,9	426,2	437,8	430,4	448,3	458	441,8	503,2
$F_{f,max}$ [N]	27	26,6	55,7	47	47,6	51,2	53,7	54,5	50,7	59,6
h_e [μm]	12,302	12,349	15,591	15,619	15,646	19,499	19,533	19,569	23,764	23,788
k_c [N/ mm ²]	3755,3	3564	5380,8	4461,8	4329,6	4050,7	3879,2	3726,1	2827,7	3034,1
k_p [N/ mm ²]	4582	4670,8	5637,4	5328,2	5473,1	4304	4483,3	4580,1	3681,9	4193,5
k_f [N/ mm ²]	451,4	444,3	696,4	587,9	595,2	512,1	537,4	545,2	423,1	497,3
t_{be} [s]	0,255	0,208	0,326	0,258	0,213	0,268	0,212	0,175	0,211	0,168
$\Delta F_c/\Delta t$ [N/s]	0,881	1,024	1,318	1,38	1,623	1,507	1,823	2,123	1,604	2,163
$\Delta F_p/\Delta t$ [N/s]	1,075	1,342	1,381	1,648	2,052	1,602	2,107	2,609	2,089	2,99
$\Delta F_f/\Delta t$ [N/s]	0,105	0,127	0,17	0,181	0,223	0,19	0,252	0,31	0,24	0,354

a_p [mm]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
f_a [mm/ford.]	1,2	1,6	1,6	1,6	2	2	2	2,4	2,4	2,4
v_c [mm]	300	200	250	300	200	250	300	200	250	300
A_c [mm ²]	0,12	0,16	0,16	0,16	0,2	0,2	0,2	0,24	0,24	0,24
$F_{c,max}$ [N]	362,6	622,5	485,9	453	733,2	554,6	531,6	559,7	653,2	650,4
$F_{p,max}$ [N]	528,2	705,3	615,9	608,7	767,6	668	668,7	640,3	617	627,3
$F_{f,max}$ [N]	62	104	82,8	81,5	126,8	96,9	96,8	92,6	111,3	114,6
h_e [μm]	23,811	31,919	31,952	31,986	40,21	40,255	40,3	49,985	50,127	50,199
k_c [N/ mm ²]	3022	3890,6	3037,1	2831,6	3666,4	2773	2658,3	2332,3	2722	2710,2
k_p [N/ mm ²]	4401,7	4408,4	3849,8	3804,8	3838,3	3340,3	3343,7	2668,3	2571,2	2613,9
k_f [N/ mm ²]	516,9	650,5	517,6	509,5	634,2	484,6	484	386,1	463,9	477,9
t_{be} [s]	0,139	0,161	0,128	0,106	0,13	0,104	0,086	0,096	0,075	0,062
$\Delta F_c/\Delta t$ [N/s]	2,6	3,855	3,783	4,256	5,602	5,327	6,165	5,822	8,612	10,361
$\Delta F_p/\Delta t$ [N/s]	3,787	4,368	4,795	5,719	5,865	6,417	7,754	6,661	8,134	9,993
$\Delta F_f/\Delta t$ [N/s]	0,444	0,644	0,644	0,765	0,969	0,931	1,122	0,964	1,467	1,827

a_p [mm]	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
f_a [mm/ford.]	2,8	2,8	2,8	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2
v_c [mm]	200	250	300	250	250	250	250	250	250	250
A_c [mm ²]	0,28	0,28	0,28	0,02	0,04	0,08	0,12	0,16	0,2	0,24
$F_{c,max}$ [N]	995,4	783,4	729,5	220,4	304,2	406,8	418,8	552,9	648,2	603,1
$F_{p,max}$ [N]	758,6	680,2	663,4	227,3	322,7	397,9	443,8	585,7	639,8	733,5
$F_{f,max}$ [N]	171	136,8	129,5	37,9	47,3	69,6	58,6	82,1	99,9	107,4
h_e [μm]	59,027	59,117	59,208	2,929	5,872	11,466	17,648	22,242	27,844	33,826
k_c [N/ mm ²]	3555,1	2797,9	2605,3	11022	7605,8	5085,6	3490,4	3456	3241,1	2513,1
k_p [N/ mm ²]	2709,3	2429,6	2369,5	11369,9	8069,7	4973,7	3698,5	3660,6	3199,2	3056,5
k_f [N/ mm ²]	610,8	488,5	462,5	1897,3	1183,1	871,1	488,4	513,5	499,6	447,6
t_{be} [s]	0,081	0,064	0,053	1,91	0,956	0,555	0,332	0,344	0,279	0,222
$\Delta F_c/\Delta t$ [N/s]	12,186	12,075	13,591	0,115	0,318	0,732	1,261	1,605	2,319	2,711
$\Delta F_p/\Delta t$ [N/s]	9,287	10,485	12,36	0,118	0,337	0,716	1,336	1,7	2,289	3,298
$\Delta F_f/\Delta t$ [N/s]	2,093	2,108	2,412	0,019	0,049	0,125	0,176	0,238	0,357	0,483

a_p [mm]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
f_a [mm/ford.]	1,6	2	2,4	2,8	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1
v_c [mm]	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250
A_c [mm ²]	0,32	0,4	0,48	0,56	0,03	0,06	0,12	0,18	0,24	0,3
$F_{c,max}$ [N]	714,3	818,8	986	1088,2	237,1	415,2	535,1	561,6	797,6	860,9
$F_{p,max}$ [N]	806,6	861,9	785,4	818,2	218	348,7	506,6	580,5	750,9	764,1
$F_{f,max}$ [N]	132,1	153,6	177	196,2	44,7	79,5	97	80,8	124,5	137,5
h_e [μm]	45,446	57,267	71,382	84,213	3,534	7,26	14,178	20,342	27,436	34,382
k_c [N/ mm ²]	2232,2	2047,1	2054,2	1943,3	7903,6	6920,6	4459,7	3120,3	3323,4	2869,7
k_p [N/ mm ²]	2520,7	2154,7	1636,3	1461,2	7269,1	5811,8	4222,3	3225,4	3129	2547
k_f [N/ mm ²]	412,9	384	368,8	350,4	1490,9	1326,5	809	449,2	519	458,6
t_{be} [s]	0,167	0,133	0,095	0,08	2,577	1,134	0,654	0,567	0,406	0,326
$\Delta F_c/\Delta t$ [N/s]	4,275	6,138	10,319	13,491	0,091	0,365	0,818	0,99	1,964	2,638
$\Delta F_p/\Delta t$ [N/s]	4,828	6,46	8,22	10,144	0,084	0,307	0,774	1,023	1,849	2,341
$\Delta F_f/\Delta t$ [N/s]	0,791	1,151	1,852	2,433	0,017	0,07	0,148	0,142	0,306	0,421

a_p [mm]	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
f_a [mm/ford.]	1,2	1,6	2	2,4	2,8
v_c [mm]	250	250	250	250	250
A_c [mm ²]	0,36	0,48	0,6	0,72	0,84
$F_{c,max}$ [N]	871,7	1029,1	1179,6	1449,3	1555,8
$F_{p,max}$ [N]	927,9	1012,5	1070,1	997,2	980,7
$F_{f,max}$ [N]	161,2	196,8	229,3	269,2	291,2
h_e [μm]	41,66	55,981	70,558	88,042	103,902
k_c [N/ mm ²]	2421,5	2144,1	1966,1	2012,9	1852,2
k_p [N/ mm ²]	2577,7	2109,4	1783,5	1385,1	1167,5
k_f [N/ mm ²]	447,8	410	382,2	373,9	346,6
t_{be} [s]	0,262	0,195	0,155	0,109	0,092
$\Delta F_c/\Delta t$ [N/s]	3,319	5,26	7,608	13,18	16,881
$\Delta F_p/\Delta t$ [N/s]	3,534	5,174	6,901	9,069	10,641
$\Delta F_f/\Delta t$ [N/s]	0,613	1,005	1,479	2,448	3,159

R30 SZERSZÁM

a_p [mm]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
f_a [mm/ford.]	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4	0,6
v_c [mm]	150	200	250	150	200	250	150	200	250	150
A_c [mm ²]	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,04	0,04	0,04	0,06
$F_{c,max}$ [N]	83,9	51,6	52,5	82,6	83,2	81,4	139,7	136,1	131,6	195,7
$F_{p,max}$ [N]	47,7	34,2	34,8	50,2	51,2	48,6	78,9	75,4	72,6	102,8
$F_{f,max}$ [N]	22,2	15,1	13,5	21,4	21,8	22,6	37,7	38,7	38,7	54,8
h_e [μm]	5,149	5,154	5,096	9,966	9,973	9,981	19,994	20,011	20,027	30,089
k_c [N/ mm ²]	8391,7	5163,4	5257,2	4131,8	4162,8	4070	3492,9	3402,7	3291,2	3261,8
k_p [N/ mm ²]	4772,1	3428	3484,6	2513,6	2561,2	2432,4	1973,2	1887,3	1817,2	1713,9
k_f [N/ mm ²]	2229,7	1512,3	1358,1	1070,6	1093,1	1134,7	943,5	967,8	968,7	914,5
t_{be} [s]	0,886	0,66	0,568	0,576	0,429	0,341	0,305	0,227	0,181	0,214
$\Delta F_c/\Delta t$ [N/s]	0,094	0,078	0,092	0,143	0,193	0,238	0,457	0,597	0,726	0,912
$\Delta F_p/\Delta t$ [N/s]	0,053	0,051	0,061	0,087	0,119	0,142	0,258	0,331	0,401	0,479
$\Delta F_f/\Delta t$ [N/s]	0,025	0,022	0,023	0,037	0,05	0,066	0,123	0,169	0,213	0,255

a_p [mm]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
f_a [mm/ford.]	0,6	0,6	0,8	0,8	0,8	1	1	1	1,2	1,2
v_c [mm]	200	250	150	200	250	150	200	250	150	200
A_c [mm ²]	0,06	0,06	0,08	0,08	0,08	0,1	0,1	0,1	0,12	0,12
$F_{c,max}$ [N]	185	179,7	245,1	224,7	223,4	299,5	276,3	268,3	363,9	331,2
$F_{p,max}$ [N]	97,1	92,8	123,8	108,9	107,6	155,7	146,2	128,5	190,7	178,5
$F_{f,max}$ [N]	54,1	55,1	71,1	65,6	67,8	87	84	84,3	105,7	100,9
h_e [μm]	30,115	30,141	40,255	40,291	40,327	50,497	50,543	50,59	60,82	60,878
k_c [N/ mm ²]	3084,7	2995,3	3064,3	2808,9	2793,6	2995,4	2763,3	2683,4	3033	2760,2
k_p [N/ mm ²]	1618,5	1547,3	1547,7	1362,1	1345,7	1557,3	1462,1	1285	1589,4	1487,9
k_f [N/ mm ²]	903,3	919	889,7	820,9	848,7	870,5	840,4	843,4	881,5	841,4
t_{be} [s]	0,159	0,127	0,168	0,125	0,099	0,14	0,104	0,083	0,12	0,09
$\Delta F_c/\Delta t$ [N/s]	1,157	1,413	1,456	1,79	2,239	2,138	2,645	3,23	3,01	3,675
$\Delta F_p/\Delta t$ [N/s]	0,607	0,729	0,735	0,868	1,078	1,111	1,399	1,547	1,577	1,981
$\Delta F_f/\Delta t$ [N/s]	0,338	0,433	0,422	0,523	0,68	0,621	0,804	1,015	0,875	1,12

a_p [mm]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
f_a [mm/ford.]	1,2	1,6	1,6	1,6	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1
v_c [mm]	250	150	200	250	200	200	200	200	200	200
A_c [mm ²]	0,12	0,16	0,16	0,16	0,02	0,04	0,08	0,12	0,16	0,2
$F_{c,max}$ [N]	325,7	453,6	422,9	393,2	99	153,7	249,5	347	429,4	509,6
$F_{p,max}$ [N]	189	238,7	211,8	164,2	55,5	83,3	125,9	176,3	211	256,5
$F_{f,max}$ [N]	103,4	134,6	132,3	127,4	26,2	43,6	75,4	107,2	136,6	163,9
h_e [μm]	60,937	81,322	81,402	81,483	7,239	14,173	28,439	42,804	57,275	71,858
k_c [N/ mm ²]	2714,9	2835,3	2643,4	2457,6	4953,1	3843,8	3119,3	2891,9	2683,8	2548,1
k_p [N/ mm ²]	1575,8	1492,2	1323,8	1026,3	2778,9	2084,5	1574,1	1469,7	1319,2	1282,8
k_f [N/ mm ²]	861,8	841,6	826,9	796,2	1310	1090,7	942,5	894	854,1	819,7
t_{be} [s]	0,071	0,099	0,073	0,058	0,986	0,586	0,303	0,208	0,16	0,131
$\Delta F_c/\Delta t$ [N/s]	4,546	4,58	5,73	6,701	0,1	0,262	0,822	1,662	2,669	3,867
$\Delta F_p/\Delta t$ [N/s]	2,639	2,41	2,869	2,798	0,056	0,142	0,414	0,845	1,312	1,947
$\Delta F_f/\Delta t$ [N/s]	1,443	1,359	1,792	2,171	0,026	0,074	0,248	0,514	0,849	1,244

a_p [mm]	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3		
f_a [mm/ford.]	1,2	1,6	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1		
v_c [mm]	200	200	200	200	200	200	200	200		
A_c [mm ²]	0,24	0,32	0,03	0,06	0,12	0,18	0,24	0,3		
$F_{c,max}$ [N]	592,2	800,2	146,9	226,6	397,1	559,2	705	897,9		
$F_{p,max}$ [N]	304,7	524,2	75,5	106,5	185,9	260,1	343,4	411,4		
$F_{f,max}$ [N]	165,5	260,3	40,7	67	125,8	180,2	235,8	305,6		
h_e [μm]	86,562	115,76	8,915	17,877	35,832	53,868	71,988	90,196		
k_c [N/ mm ²]	2467,5	2500,6	4899,4	3777,2	3309,4	3107	2937,6	2993,3		
k_p [N/ mm ²]	1269,9	1638,1	2517,7	1775	1549,4	1445	1431,2	1371,4		
k_f [N/ mm ²]	689,7	813,4	1358	1117	1049,1	1001,4	982,9	1018,8		
t_{be} [s]	0,112	0,089	1,187	0,598	0,309	0,212	0,164	0,134		
$\Delta F_c/\Delta t$ [N/s]	5,284	8,93	0,123	0,378	1,282	2,626	4,29	6,655		
$\Delta F_p/\Delta t$ [N/s]	2,719	5,85	0,063	0,177	0,6	1,221	2,09	3,049		
$\Delta F_f/\Delta t$ [N/s]	1,477	2,904	0,034	0,111	0,406	0,846	1,435	2,265		

R45 SZERSZÁM

a_p [mm]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
f_a [mm/ford.]	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4	0,6
v_c [mm]	150	200	250	150	200	250	150	200	250	150
A_c [mm ²]	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,04	0,04	0,04	0,06
$F_{c,max}$ [N]	65,4	59,4	66,6	90,2	86,9	87,9	139	140,3	139,4	186,7
$F_{p,max}$ [N]	27,3	30,4	35,9	38,1	40,4	42,4	51,7	58	58,3	67,2
$F_{f,max}$ [N]	23,5	21,7	25,7	32,2	31,3	32,9	51,3	54,2	56,4	71,3
h_e [μm]	9,452	9,364	9,407	18,903	18,728	18,813	37,773	37,424	37,593	56,608
k_c [N/ mm ²]	6548,9	5941,5	6668,9	4513,7	4347	4397,7	3475,7	3509,3	3487,2	3111,7
k_p [N/ mm ²]	2735	3040,9	3598,3	1906	2021,3	2121,1	1293,3	1450,2	1458,6	1120,8
k_f [N/ mm ²]	2358,7	2175,5	2579,8	1612,4	1567,6	1645,8	1283,4	1356,4	1411,5	1189,6
t_{be} [s]	0,538	0,434	0,335	0,29	0,234	0,18	0,167	0,134	0,104	0,126
$\Delta F_c/\Delta t$ [N/s]	0,121	0,136	0,198	0,31	0,371	0,486	0,829	1,041	1,338	1,478
$\Delta F_p/\Delta t$ [N/s]	0,05	0,07	0,107	0,131	0,172	0,234	0,308	0,43	0,559	0,532
$\Delta F_f/\Delta t$ [N/s]	0,043	0,05	0,076	0,11	0,133	0,181	0,306	0,402	0,541	0,565

a_p [mm]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2
f_a [mm/ford.]	0,6	0,6	0,8	0,8	0,8	1	1	1	0,1	0,2
v_c [mm]	200	250	150	200	250	150	200	250	200	200
A_c [mm ²]	0,06	0,06	0,08	0,08	0,08	0,1	0,1	0,1	0,02	0,04
$F_{c,max}$ [N]	190	183,9	248	237,3	229,4	286	280,8	272,6	107,3	170,2
$F_{p,max}$ [N]	73,6	71	87,2	85,8	78	99,3	97,6	86	54,4	78
$F_{f,max}$ [N]	74,9	78	95,8	96,2	98,7	111,4	114,8	118,2	41,1	68,4
h_e [μm]	56,086	56,34	75,409	74,716	75,052	94,175	93,311	93,731	12,907	25,826
k_c [N/ mm ²]	3167,2	3066	3100,8	2966,8	2867,7	2860,5	2808,2	2726,7	5369,4	4256,2
k_p [N/ mm ²]	1227,6	1184,6	1091,1	1072,9	975,2	993,1	976,5	860,5	2724,7	1950,6
k_f [N/ mm ²]	1249,4	1301,5	1198,4	1203,1	1234,2	1114,5	1148	1182,3	2059	1711,3
t_{be} [s]	0,101	0,078	0,105	0,084	0,065	0,092	0,074	0,057	0,741	0,389
$\Delta F_c/\Delta t$ [N/s]	1,87	2,343	2,351	2,797	3,497	3,077	3,757	4,719	0,144	0,436
$\Delta F_p/\Delta t$ [N/s]	0,725	0,905	0,827	1,011	1,189	1,068	1,306	1,489	0,073	0,2
$\Delta F_f/\Delta t$ [N/s]	0,738	0,994	0,908	1,134	1,505	1,199	1,536	2,046	0,055	0,175

a_p [mm]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
f_a [mm/ford.]	0,4	0,6	0,8	1	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1
v_c [mm]	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
A_c [mm ²]	0,08	0,12	0,16	0,2	0,03	0,06	0,12	0,18	0,24	0,3
$F_{c,max}$ [N]	272,6	364,9	454,3	535,8	170,8	256,1	401,5	542,8	671,4	795,2
$F_{p,max}$ [N]	100,2	117,5	125,5	129,8	78,2	102,4	122,3	135,4	131,2	143,3
$F_{f,max}$ [N]	117,9	164,9	210,5	255	72,1	110,2	189,8	267,1	339,3	410,9
h_e [μm]	51,64	77,44	103,227	129	15,914	31,863	63,754	95,67	127,615	159,587
k_c [N/ mm ²]	3407,9	3040,8	2839,4	2679,4	5694	4269,3	3346	3015,8	2797,8	2650,7
k_p [N/ mm ²]	1252,6	979,5	784,5	649,3	2609,7	1708,2	1019,8	752,4	546,8	477,8
k_f [N/ mm ²]	1474,7	1374,8	1316,1	1275,4	2405,2	1837,5	1581,9	1484	1413,9	1369,6
t_{be} [s]	0,215	0,156	0,127	0,109	0,849	0,439	0,237	0,169	0,135	0,114
$\Delta F_c/\Delta t$ [N/s]	1,267	2,33	3,572	4,899	0,201	0,583	1,693	3,206	4,969	6,95
$\Delta F_p/\Delta t$ [N/s]	0,466	0,75	0,987	1,187	0,092	0,233	0,516	0,799	0,971	1,253
$\Delta F_f/\Delta t$ [N/s]	0,548	1,053	1,655	2,332	0,084	0,25	0,8	1,577	2,511	3,591

R50 SZERSZÁM

a_p [mm]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
f_a [mm/ford.]	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4	0,6
v_c [mm]	150	200	250	150	200	250	150	200	250	150
A_c [mm ²]	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,04	0,04	0,04	0,06
$F_{c,max}$ [N]	66,2	61,9	61,8	101,7	93,9	91,7	155	151,9	149,9	233,8
$F_{p,max}$ [N]	28,6	28,3	28,9	40	37,5	36,3	48,9	50,5	47,9	71,9
$F_{f,max}$ [N]	22	22,1	21,3	38,3	36,9	38,8	63,9	66,6	69,8	98
h_e [μm]	10,064	10,07	10,077	20,01	20,022	20,035	40,372	40,4	40,428	60,796
k_c [N/ mm ²]	6626,6	6198,2	6182	5086,9	4698	4585,5	3876,5	3799,5	3749,2	3897,9
k_p [N/ mm ²]	2865,1	2835,9	2897,6	2000,5	1877,2	1819,2	1224,7	1263,7	1199,3	1198,3
k_f [N/ mm ²]	2206	2212,6	2130,7	1918,7	1847,7	1940,1	1599,4	1665,9	1746,1	1633,9
t_{be} [s]	0,631	0,471	0,375	0,358	0,267	0,212	0,193	0,144	0,114	0,141
$\Delta F_c/\Delta t$ [N/s]	0,104	0,131	0,164	0,284	0,351	0,43	0,801	1,052	1,304	1,649
$\Delta F_p/\Delta t$ [N/s]	0,045	0,06	0,077	0,111	0,14	0,17	0,253	0,35	0,417	0,507
$\Delta F_f/\Delta t$ [N/s]	0,034	0,046	0,056	0,107	0,138	0,182	0,33	0,461	0,607	0,691

a_p [mm]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
f_a [mm/ford.]	0,6	0,6	0,8	0,8	0,8	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8
v_c [mm]	200	250	150	200	250	200	200	200	200	200
A_c [mm ²]	0,06	0,06	0,08	0,08	0,08	0,02	0,04	0,08	0,12	0,16
$F_{c,max}$ [N]	203,4	201,1	250,9	257,8	243,7	109,1	170,4	269,9	377	469
$F_{p,max}$ [N]	65,4	58,6	81,7	78,7	66,9	41,1	53,7	62,7	85,4	103,4
$F_{f,max}$ [N]	90,2	98,4	104,7	117,2	120,9	44,3	76,7	137,3	194,8	241,7
h_e [μm]	61,858	60,84	82,389	82,532	82,46	14,233	28,296	57,104	85,94	116,605
k_c [N/ mm ²]	3390,3	3351,9	3136,8	3222,6	3046,9	5458,8	4262,2	3374,7	3142,3	2931,6
k_p [N/ mm ²]	1090,8	977,9	1021,5	983,7	837,1	2058,6	1344,8	784,9	712,4	646,5
k_f [N/ mm ²]	1504,4	1640	1308,9	1465,9	1512	2219,6	1917,5	1717,2	1624	1510,9
t_{be} [s]	0,094	0,084	0,105	0,078	0,063	0,643	0,356	0,185	0,132	0,095
$\Delta F_c/\Delta t$ [N/s]	2,156	2,376	2,371	3,286	3,862	0,169	0,478	1,457	2,847	4,9
$\Delta F_p/\Delta t$ [N/s]	0,693	0,693	0,772	1,003	1,061	0,064	0,15	0,338	0,645	1,08
$\Delta F_f/\Delta t$ [N/s]	0,956	1,162	0,989	1,495	1,916	0,069	0,215	0,741	1,471	2,525

a_p [mm]	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3					
f_a [mm/ford.]	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8					
v_c [mm]	200	200	200	200	200					
A_c [mm ²]	0,03	0,06	0,12	0,18	0,24					
$F_{c,max}$ [N]	153,4	245,8	424,7	570,3	718,1					
$F_{p,max}$ [N]	50,2	63,8	105,6	106,6	142,7					
$F_{f,max}$ [N]	70,8	123,8	225,6	318,7	391,2					
h_e [μm]	17,424	34,638	69,915	105,23	142,829					
k_c [N/ mm ²]	5116,4	4097,1	3539,9	3168,5	2992,2					
k_p [N/ mm ²]	1673,5	1063,8	880,5	592,6	594,7					
k_f [N/ mm ²]	2362,8	2064,6	1880,3	1770,6	1630,2					
t_{be} [s]	0,771	0,423	0,215	0,151	0,108					
$\Delta F_c/\Delta t$ [N/s]	0,198	0,58	1,969	3,757	6,642					
$\Delta F_p/\Delta t$ [N/s]	0,065	0,15	0,489	0,702	1,32					
$\Delta F_f/\Delta t$ [N/s]	0,091	0,292	1,046	2,099	3,618					

CNMG SZERSZÁM

a_p [mm]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
f_a [mm/ford.]	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4	0,6
v_c [mm]	200	250	300	200	250	300	200	250	300	200
A_c [mm ²]	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,04	0,04	0,04	0,06
$F_{c,max}$ [N]	55,2	52,1	52,5	81,5	79,5	78,5	130,1	129,3	127,6	178
$F_{p,max}$ [N]	73,1	73,7	76,1	92,3	97,9	99,9	127,5	133	136,8	169,8
$F_{f,max}$ [N]	17,2	17,5	17	18,3	19,6	20,1	23,7	25,3	24,7	28,8
h_e [μm]	20,268	20,268	20,268	40,537	40,537	40,537	81,075	81,075	81,075	121,613
k_c [N/ mm ²]	5527,8	5212,4	5255,8	4076,7	3979,1	3928,1	3253,7	3234,1	3191,3	2967,7
k_p [N/ mm ²]	7311,4	7377,7	7613,4	4618,2	4897,6	4998,1	3188,2	3326,4	3421,2	2830,5
k_f [N/ mm ²]	1728,2	1756,2	1708,1	918,5	983,3	1009,3	594,2	634,4	619,8	481,5
t_{be} [s]	0,184	0,146	0,121	0,103	0,081	0,067	0,063	0,05	0,041	0,048
$\Delta F_c/\Delta t$ [N/s]	0,299	0,355	0,432	0,79	0,97	1,157	2,065	2,583	3,079	3,645
$\Delta F_p/\Delta t$ [N/s]	0,396	0,502	0,625	0,895	1,194	1,472	2,024	2,657	3,301	3,477
$\Delta F_f/\Delta t$ [N/s]	0,093	0,119	0,14	0,178	0,239	0,297	0,377	0,506	0,598	0,591

a_p [mm]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2
f_a [mm/ford.]	0,6	0,6	0,8	0,8	0,8	1	1	1	0,1	0,2
v_c [mm]	250	300	200	250	300	200	250	300	250	250
A_c [mm ²]	0,06	0,06	0,08	0,08	0,08	0,1	0,1	0,1	0,02	0,04
$F_{c,max}$ [N]	175,8	175,3	230,8	229,4	222,5	280,6	289,2	269	87,7	134,5
$F_{p,max}$ [N]	171,2	173,6	210,5	217,3	207,7	250,4	256,3	246,2	109,3	142,8
$F_{f,max}$ [N]	28,4	29,9	29,4	33,5	30,8	32,6	36,8	32,8	36,6	42,9
h_e [μm]	121,613	121,613	162,151	162,151	162,151	202,689	202,689	202,689	28,456	56,913
k_c [N/ mm ²]	2931	2923,1	2885,9	2868	2782	2806,7	2892,8	2690,9	4386,2	3363,1
k_p [N/ mm ²]	2854,1	2894,4	2631,8	2716,3	2596,4	2504	2563,2	2462,7	5468	3570,5
k_f [N/ mm ²]	474,2	499	368,4	419,5	386	326,8	368,6	328,1	1832,7	1074
t_{be} [s]	0,038	0,032	0,041	0,032	0,026	0,035	0,026	0,023	0,191	0,102
$\Delta F_c/\Delta t$ [N/s]	4,532	5,462	5,63	7,046	8,263	7,862	10,715	11,395	0,459	1,308
$\Delta F_p/\Delta t$ [N/s]	4,413	5,408	5,134	6,673	7,712	7,014	9,494	10,429	0,572	1,388
$\Delta F_f/\Delta t$ [N/s]	0,733	0,932	0,718	1,03	1,146	0,915	1,365	1,389	0,191	0,417

a_p [mm]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
f_a [mm/ford.]	0,4	0,6	0,8	1	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1
v_c [mm]	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250
A_c [mm ²]	0,08	0,12	0,16	0,2	0,03	0,06	0,12	0,18	0,24	0,3
$F_{c,max}$ [N]	216,7	298,2	373,3	447	120,5	184,3	304,4	417	529,9	634,9
$F_{p,max}$ [N]	187,3	233,5	273	311	137	169,7	228,2	283,9	338,5	384,4
$F_{f,max}$ [N]	51,8	56,3	64,6	69,4	58,1	66,7	78,8	95,9	109,3	103,5
h_e [μm]	113,826	170,74	227,653	284,566	34,59	69,181	138,363	207,545	276,726	345,908
k_c [N/ mm ²]	2709	2485,4	2333,5	2235,2	4017,3	3072	2537	2316,9	2208,3	2116,4
k_p [N/ mm ²]	2342	1946,5	1706,5	1555	4569,9	2828,4	1902,2	1577,2	1410,4	1281,4
k_f [N/ mm ²]	647,5	469,2	404	347,2	1938,5	1112,4	657,2	533,1	455,7	345
t_{be} [s]	0,059	0,044	0,036	0,031	0,221	0,116	0,066	0,048	0,039	0,033
$\Delta F_c/\Delta t$ [N/s]	3,628	6,662	10,177	14,145	0,545	1,587	4,602	8,565	13,467	18,93
$\Delta F_p/\Delta t$ [N/s]	3,136	5,217	7,442	9,84	0,62	1,461	3,45	5,83	8,601	11,462
$\Delta F_f/\Delta t$ [N/s]	0,867	1,257	1,762	2,197	0,263	0,574	1,192	1,97	2,779	3,085

M.3. A felületi érdesség kísérleti és elméleti eredményei

R13 SZERSZÁM

a_p [mm]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
f_a [mm/ford.]	0,2	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6	0,8
v_c [mm]	200	250	300	200	250	300	200	250	300	200
$R_{a,1}$ [μm]	0,68	0,59	0,65	1,07	0,61	0,66	1,84	1,03	1,07	2,13
$R_{a,2}$ [μm]	0,76	0,64	0,61	1,09	0,61	0,59	1,79	0,94	1,00	1,92
$R_{a,3}$ [μm]	0,59	0,62	0,61	1,12	0,62	0,64	1,82	0,89	1,18	2,10
$R_{a,\bar{a}}$ [μm]	0,676	0,616	0,623	1,093	0,613	0,630	1,816	0,953	1,083	2,050
$R_{z,1}$ [μm]	4,16	3,92	4,02	7,46	4,35	4,88	10,71	7,01	7,40	9,27
$R_{z,2}$ [μm]	4,63	3,89	3,72	7,77	4,29	4,32	9,58	6,72	7,33	9,07
$R_{z,3}$ [μm]	3,92	3,60	3,75	7,64	4,47	4,32	8,90	6,24	7,56	9,08
$R_{z,\bar{a}}$ [μm]	4,236	3,803	3,830	7,623	4,370	4,506	9,730	6,656	7,430	9,140
$R_{a,e}$	0,012	0,012	0,012	0,048	0,049	0,049	0,115	0,115	0,115	0,196
$R_{t,e}$	0,047	0,047	0,047	0,19	0,191	0,191	0,448	0,449	0,45	0,766

a_p [mm]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
f_a [mm/ford.]	0,8	0,8	1	1	1	1,2	1,2	1,2	1,6	1,6
v_c [mm]	250	300	200	250	300	200	250	300	200	250
$R_{a,1}$ [μm]	1,01	1,13	1,54	1,27	1,41	1,21	0,99	1,00	1,33	1,35
$R_{a,2}$ [μm]	1,01	1,05	1,51	1,38	1,52	1,12	0,96	0,96	1,22	1,29
$R_{a,3}$ [μm]	1,02	1,01	1,51	1,32	1,47	1,26	1,06	0,97	1,33	1,37
$R_{a,\bar{a}}$ [μm]	1,013	1,063	1,520	1,323	1,466	1,196	1,003	0,976	1,293	1,336
$R_{z,1}$ [μm]	7,24	7,10	11,43	9,11	9,98	8,28	6,96	7,50	10,69	10,19
$R_{z,2}$ [μm]	6,64	7,14	11,07	10,49	10,44	7,46	6,41	7,35	9,90	9,24
$R_{z,3}$ [μm]	6,10	6,94	11,07	9,54	9,78	8,38	7,33	6,76	9,32	10,25
$R_{z,\bar{a}}$ [μm]	6,660	7,060	11,190	9,713	10,066	8,040	6,900	7,203	9,970	9,893
$R_{a,e}$	0,196	0,197	0,321	0,322	0,322	0,444	0,444	0,445	0,793	0,794
$R_{t,e}$	0,767	0,768	1,253	1,255	1,257	1,731	1,733	1,735	3,092	3,096

a_p [mm]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
f_a [mm/ford.]	1,6	2	2	2	2,4	2,4	2,4	2,8	2,8	2,8
v_c [mm]	300	200	250	300	200	250	300	200	250	300
$R_{a,1}$ [μm]	1,33	1,90	1,71	1,71	2,15	2,24	2,30	2,96	2,76	2,96
$R_{a,2}$ [μm]	1,26	2,14	1,76	1,78	2,18	2,34	2,37	2,80	2,72	2,84
$R_{a,3}$ [μm]	1,33	1,88	1,83	1,78	2,24	2,34	2,58	2,84	2,61	3,07
$R_{a,\bar{a}}$ [μm]	1,306	1,973	1,766	1,756	2,190	2,306	2,416	2,866	2,696	2,956
$R_{z,1}$ [μm]	9,71	10,11	10,98	11,11	11,82	12,08	12,24	16,38	16,09	16,69
$R_{z,2}$ [μm]	9,36	11,96	11,09	11,07	11,66	11,87	12,33	15,14	15,02	17,64
$R_{z,3}$ [μm]	9,82	11,09	10,98	10,00	11,70	11,87	12,52	16,03	14,38	16,82
$R_{z,\bar{a}}$ [μm]	9,630	11,053	11,016	10,726	11,726	11,940	12,363	15,850	15,163	17,050
$R_{a,e}$	0,795	1,246	1,248	1,249	1,803	1,806	1,808	2,467	2,47	2,473
$R_{t,e}$	3,099	4,86	4,866	4,872	7,034	7,043	7,052	9,625	9,637	9,65

a_p [mm]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
f_a [mm/ford.]	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,6	2	2,4	2,8
v_c [mm]	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250
$R_{a,1}$ [μm]	0,60	0,63	0,93	1,09	1,51	1,01	1,29	1,78	2,58	3,19
$R_{a,2}$ [μm]	0,61	0,61	1,11	1,12	1,32	1,07	1,44	2,05	2,46	3,22
$R_{a,3}$ [μm]	0,63	0,65	1,00	1,07	1,51	0,92	1,50	1,93	2,43	3,22
$R_{a,\bar{a}}$ [μm]	0,613	0,630	1,013	1,093	1,446	1,000	1,410	1,920	2,490	3,210
$R_{z,1}$ [μm]	3,51	4,58	6,51	6,19	10,24	7,17	9,75	11,57	12,47	16,16
$R_{z,2}$ [μm]	3,71	4,61	7,36	6,71	9,28	6,37	10,19	11,74	12,47	18,15
$R_{z,3}$ [μm]	3,58	4,65	7,61	6,16	10,44	6,43	10,36	11,74	12,01	18,12
$R_{z,\bar{a}}$ [μm]	3,600	4,613	7,160	6,353	9,986	6,656	10,100	11,683	12,316	17,476
$R_{a,e}$	0,012	0,049	0,115	0,197	0,323	0,445	0,796	1,251	1,81	2,476
$R_{t,e}$	0,047	0,191	0,45	0,768	1,259	1,737	3,103	4,878	7,061	9,663

a_p [mm]	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
f_a [mm/ford.]	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,6	2	2,4	2,8
v_c [mm]	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250
$R_{a,1}$ [μm]	0,63	0,73	1,15	1,35	1,41	1,08	1,41	2,31	3,12	3,46
$R_{a,2}$ [μm]	0,62	0,81	1,17	1,43	1,58	1,11	1,53	1,95	2,65	3,53
$R_{a,3}$ [μm]	0,60	0,71	1,08	1,24	1,49	1,15	1,63	2,02	2,74	3,61
$R_{a,\bar{a}}$ [μm]	0,616	0,750	1,133	1,340	1,493	1,113	1,523	2,093	2,836	3,533
$R_{z,1}$ [μm]	3,60	5,26	8,55	7,82	9,30	8,21	11,22	13,63	14,86	19,16
$R_{z,2}$ [μm]	3,50	5,46	9,06	8,23	10,24	7,93	10,71	12,50	15,65	19,16
$R_{z,3}$ [μm]	3,56	5,64	7,74	8,02	10,35	7,82	12,13	13,24	14,65	20,05
$R_{z,\bar{a}}$ [μm]	3,553	5,453	8,450	8,023	9,963	7,986	11,353	13,123	15,053	19,456
$R_{a,e}$	0,012	0,052	0,117	0,21	0,33	0,477	0,852	1,336	1,932	2,64
$R_{t,e}$	0,047	0,203	0,459	0,82	1,287	1,862	3,323	5,213	7,537	10,302

R15 SZERSZÁM

a_p [mm]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
f_a [mm/ford.]	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4	0,6
v_c [mm]	200	250	300	200	250	300	200	250	300	200
$R_{a,1}$ [μm]	0,42	0,47	0,51	0,74	0,65	0,62	0,75	0,62	0,59	1,13
$R_{a,2}$ [μm]	0,41	0,48	0,51	0,68	0,63	0,58	0,61	0,56	0,62	1,36
$R_{a,3}$ [μm]	0,40	0,47	0,50	0,66	0,63	0,59	0,58	0,57	0,56	1,25
$R_{a,\bar{a}}$ [μm]	0,410	0,473	0,506	0,693	0,636	0,596	0,646	0,583	0,590	1,246
$R_{z,1}$ [μm]	2,48	2,38	2,31	4,27	4,20	3,92	4,47	3,59	3,60	6,51
$R_{z,2}$ [μm]	2,17	2,40	2,81	4,23	4,12	3,71	3,62	3,54	3,57	7,68
$R_{z,3}$ [μm]	2,18	2,31	2,54	4,02	4,12	3,68	3,46	3,51	3,33	7,08
$R_{z,\bar{a}}$ [μm]	2,276	2,363	2,553	4,173	4,146	3,770	3,850	3,546	3,500	7,090
$R_{a,e}$	0,002	0,002	0,002	0,01	0,01	0,01	0,041	0,041	0,041	0,095
$R_{t,e}$	0,01	0,01	0,01	0,041	0,041	0,042	0,159	0,161	0,161	0,372

a_p [mm]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
f_a [mm/ford.]	0,6	0,6	0,8	0,8	0,8	1	1	1	1,2	1,2
v_c [mm]	250	300	200	250	300	200	250	300	200	250
$R_{a,1}$ [μm]	1,53	1,76	1,29	1,03	1,07	1,09	1,34	1,22	0,98	0,91
$R_{a,2}$ [μm]	1,19	1,26	1,15	0,92	1,44	1,14	1,21	0,96	1,22	0,83
$R_{a,3}$ [μm]	1,23	1,69	1,02	0,90	0,79	0,81	1,02	1,13	0,98	0,87
$R_{a,\bar{a}}$ [μm]	1,316	1,570	1,153	0,950	1,100	1,013	1,190	1,103	1,060	0,870
$R_{z,1}$ [μm]	8,24	8,87	10,89	5,78	6,61	6,96	8,21	7,31	6,06	5,14
$R_{z,2}$ [μm]	7,28	7,24	9,75	6,01	6,98	6,74	7,06	6,81	7,17	5,22
$R_{z,3}$ [μm]	7,57	8,97	9,51	5,71	5,14	6,32	5,81	5,91	5,08	5,11
$R_{z,\bar{a}}$ [μm]	7,696	8,360	10,050	5,833	6,243	6,673	7,026	6,676	6,103	5,156
$R_{a,e}$	0,096	0,097	0,154	0,155	0,156	0,242	0,243	0,244	0,359	0,36
$R_{t,e}$	0,375	0,378	0,603	0,605	0,608	0,944	0,947	0,951	1,402	1,405

a_p [mm]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
f_a [mm/ford.]	1,2	1,6	1,6	1,6	2	2	2	2,4	2,4	2,4
v_c [mm]	300	200	250	300	200	250	300	200	250	300
$R_{a,1}$ [μm]	1,01	1,02	0,99	1,08	1,47	1,72	1,25	3,00	2,31	2,64
$R_{a,2}$ [μm]	1,05	1,15	1,20	1,25	1,48	1,81	1,35	2,46	2,71	2,55
$R_{a,3}$ [μm]	0,89	1,11	1,01	0,90	1,44	1,73	1,39	2,62	2,31	2,42
$R_{a,\bar{a}}$ [μm]	0,983	1,093	1,066	1,076	1,463	1,753	1,330	2,693	2,443	2,536
$R_{z,1}$ [μm]	5,91	6,75	6,18	6,57	10,54	10,96	9,06	13,78	13,39	14,39
$R_{z,2}$ [μm]	5,81	7,40	6,84	7,26	9,70	10,43	8,43	14,20	13,43	13,80
$R_{z,3}$ [μm]	5,58	6,66	6,41	6,12	9,06	11,05	9,03	13,91	13,09	11,52
$R_{z,\bar{a}}$ [μm]	5,766	6,936	6,476	6,650	9,766	10,813	8,840	13,963	13,303	13,236
$R_{a,e}$	0,361	0,648	0,65	0,651	1,029	1,032	1,034	1,59	1,599	1,603
$R_{t,e}$	1,407	2,529	2,534	2,54	4,014	4,023	4,032	6,2	6,235	6,252

a_p [mm]	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
f_a [mm/ford.]	2,8	2,8	2,8	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2
v_c [mm]	200	250	300	250	250	250	250	250	250	250
$R_{a,1}$ [μm]	2,17	3,11	2,69	0,48	0,73	0,61	1,45	1,34	0,97	0,91
$R_{a,2}$ [μm]	1,93	3,24	2,79	0,55	0,66	0,60	1,26	1,19	1,28	0,90
$R_{a,3}$ [μm]	2,15	3,29	2,60	0,45	0,68	0,60	1,31	1,43	1,15	0,80
$R_{a,\bar{a}}$ [μm]	2,083	3,213	2,693	0,493	0,690	0,603	1,340	1,320	1,133	0,870
$R_{z,1}$ [μm]	14,36	15,94	15,18	2,36	4,56	3,65	8,68	7,58	5,29	6,31
$R_{z,2}$ [μm]	12,79	16,90	15,38	3,33	4,32	3,61	7,20	7,11	6,77	5,53
$R_{z,3}$ [μm]	12,61	17,15	14,53	2,66	4,29	3,59	7,74	7,63	6,62	5,44
$R_{z,\bar{a}}$ [μm]	13,253	16,663	15,030	2,783	4,390	3,616	7,873	7,440	6,226	5,760
$R_{a,e}$	2,216	2,223	2,23	0,002	0,01	0,041	0,098	0,156	0,245	0,361
$R_{t,e}$	8,645	8,671	8,698	0,01	0,042	0,161	0,383	0,61	0,956	1,41

a_p [mm]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
f_a [mm/ford.]	1,6	2	2,4	2,8	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1
v_c [mm]	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250
$R_{a,1}$ [μm]	1,14	1,27	2,78	2,71	0,66	0,70	0,67	1,76	1,82	1,19
$R_{a,2}$ [μm]	0,92	1,53	2,87	2,60	0,57	0,77	0,68	1,25	2,25	1,44
$R_{a,3}$ [μm]	1,01	1,37	2,91	2,88	0,57	0,76	0,62	1,43	1,60	1,09
$R_{a,\bar{a}}$ [μm]	1,023	1,390	2,853	2,730	0,600	0,743	0,656	1,480	1,890	1,240
$R_{z,1}$ [μm]	6,51	8,91	14,01	16,47	2,91	4,97	4,12	8,83	9,84	6,75
$R_{z,2}$ [μm]	6,02	9,56	14,89	15,07	2,89	4,89	3,82	7,93	10,73	7,88
$R_{z,3}$ [μm]	6,08	8,55	14,74	17,17	2,81	4,60	3,74	7,74	8,25	6,89
$R_{z,\bar{a}}$ [μm]	6,203	9,006	14,546	16,236	2,870	4,820	3,893	8,166	9,606	7,173
$R_{a,e}$	0,653	1,036	1,608	2,237	0,002	0,011	0,042	0,086	0,157	0,247
$R_{t,e}$	2,545	4,041	6,27	8,725	0,01	0,042	0,163	0,338	0,614	0,965

a_p [mm]	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
f_a [mm/ford.]	1,2	1,6	2	2,4	2,8
v_c [mm]	250	250	250	250	250
$R_{a,1}$ [μm]	1,16	1,07	1,39	3,05	2,89
$R_{a,2}$ [μm]	1,14	1,01	1,41	3,18	2,84
$R_{a,3}$ [μm]	0,97	0,92	1,41	3,56	3,11
$R_{a,\bar{a}}$ [μm]	1,090	1,000	1,403	3,263	2,946
$R_{z,1}$ [μm]	6,66	6,99	9,53	14,20	15,67
$R_{z,2}$ [μm]	7,34	5,95	9,04	16,79	16,65
$R_{z,3}$ [μm]	5,81	5,96	9,04	16,21	16,05
$R_{z,\bar{a}}$ [μm]	6,603	6,300	9,203	15,733	16,123
$R_{a,e}$	0,363	0,655	1,041	1,617	2,251
$R_{t,e}$	1,416	2,556	4,059	6,307	8,779

R30 SZERSZÁM

a_p [mm]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
f_a [mm/ford.]	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4	0,6
v_c [mm]	150	200	250	150	200	250	150	200	250	150
$R_{a,1}$ [μm]	0,52	0,47	0,45	0,48	0,47	0,45	0,56	0,54	0,60	0,76
$R_{a,2}$ [μm]	0,50	0,45	0,44	0,48	0,48	0,45	0,54	0,55	0,63	0,73
$R_{a,3}$ [μm]	0,51	0,48	0,44	0,47	0,49	0,44	0,55	0,57	0,61	0,69
$R_{a,\bar{a}}$ [μm]	0,510	0,466	0,443	0,476	0,480	0,446	0,550	0,553	0,613	0,726
$R_{z,1}$ [μm]	3,14	3,22	3,04	3,95	3,82	3,81	4,08	3,58	4,60	5,45
$R_{z,2}$ [μm]	3,09	2,83	2,95	3,89	3,79	3,80	4,03	3,54	4,49	5,68
$R_{z,3}$ [μm]	3,45	3,05	3,07	3,70	3,73	3,78	3,90	3,45	4,27	4,72
$R_{z,\bar{a}}$ [μm]	3,226	3,033	3,020	3,846	3,780	3,796	4,003	3,523	4,453	5,283
$R_{a,e}$	0,016	0,016	0,016	0,063	0,063	0,063	0,254	0,255	0,255	0,577
$R_{t,e}$	0,065	0,065	0,064	0,246	0,247	0,247	0,993	0,994	0,996	2,249

a_p [mm]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
f_a [mm/ford.]	0,6	0,6	0,8	0,8	0,8	1	1	1	1,2	1,2
v_c [mm]	200	250	150	200	250	150	200	250	150	200
$R_{a,1}$ [μm]	0,73	0,76	1,43	1,20	1,10	1,88	1,15	1,63	2,74	2,78
$R_{a,2}$ [μm]	0,69	0,74	1,50	1,39	1,18	2,09	1,08	1,62	2,79	2,86
$R_{a,3}$ [μm]	0,74	0,78	1,49	1,28	1,08	1,98	1,14	1,57	2,74	2,79
$R_{a,\bar{a}}$ [μm]	0,720	0,760	1,473	1,290	1,120	1,983	1,123	1,606	2,756	2,810
$R_{z,1}$ [μm]	5,18	5,95	8,09	7,42	6,89	9,97	7,39	9,44	11,69	12,17
$R_{z,2}$ [μm]	5,19	5,19	8,68	7,16	7,32	10,71	6,57	8,94	12,18	12,51
$R_{z,3}$ [μm]	5,67	5,39	7,71	7,24	6,87	10,09	7,35	9,90	12,21	11,78
$R_{z,\bar{a}}$ [μm]	5,346	5,510	8,160	7,273	7,026	10,256	7,103	9,426	12,026	12,153
$R_{a,e}$	0,578	0,579	1,032	1,034	1,036	1,624	1,627	1,63	2,356	2,361
$R_{t,e}$	2,253	2,256	4,026	4,033	4,04	6,336	6,348	6,359	9,193	9,211

a_p [mm]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
f_a [mm/ford.]	1,2	1,6	1,6	1,6	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1
v_c [mm]	250	150	200	250	200	200	200	200	200	200
$R_{a,1}$ [μm]	2,16	3,64	4,53	3,02	0,49	0,53	0,66	0,81	1,59	1,93
$R_{a,2}$ [μm]	2,20	3,82	4,39	2,79	0,48	0,53	0,65	0,75	1,62	1,81
$R_{a,3}$ [μm]	2,20	3,77	4,19	2,92	0,49	0,53	0,65	0,78	1,49	1,91
$R_{a,\bar{a}}$ [μm]	2,186	3,743	4,370	2,910	0,486	0,530	0,653	0,780	1,566	1,883
$R_{z,1}$ [μm]	13,72	20,12	21,27	18,62	3,52	4,42	4,92	5,78	8,41	10,03
$R_{z,2}$ [μm]	12,43	21,20	19,77	18,71	3,40	4,36	4,86	5,62	8,58	9,30
$R_{z,3}$ [μm]	13,69	20,09	19,73	18,96	3,41	4,30	4,66	5,59	8,37	9,20
$R_{z,\bar{a}}$ [μm]	13,280	20,470	20,256	18,763	3,443	4,360	4,813	5,663	8,453	9,510
$R_{a,e}$	2,365	4,213	4,221	4,229	0,016	0,063	0,256	0,58	1,038	1,633
$R_{t,e}$	9,228	16,447	16,479	16,512	0,064	0,247	0,998	2,26	4,047	6,371

a_p [mm]	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2
f_a [mm/ford.]	1,2	1,6	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,6
v_c [mm]	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
$R_{a,1}$ [μm]	3,19	3,08	0,50	0,47	0,45	0,85	1,57	1,98	3,19	3,08
$R_{a,2}$ [μm]	3,19	4,01	0,49	0,51	0,45	0,81	1,61	2,17	3,19	4,01
$R_{a,3}$ [μm]	3,26	2,96	0,46	0,49	0,47	0,92	1,32	1,76	3,26	2,96
$R_{a,\bar{a}}$ [μm]	3,213	3,350	0,483	0,490	0,456	0,860	1,500	1,970	3,213	3,350
$R_{z,1}$ [μm]	14,88	19,24	3,26	3,76	3,28	5,24	7,94	9,42	14,88	19,24
$R_{z,2}$ [μm]	13,84	21,78	3,04	3,67	3,28	5,28	8,07	9,46	13,84	21,78
$R_{z,3}$ [μm]	13,99	17,99	3,23	3,55	3,21	5,89	7,33	8,55	13,99	17,99
$R_{z,\bar{a}}$ [μm]	14,236	19,670	3,176	3,660	3,256	5,470	7,780	9,143	14,236	19,670
$R_{a,e}$	2,37	4,238	0,016	0,066	0,268	0,607	1,084	1,701	2,37	4,238
$R_{t,e}$	9,246	16,545	0,064	0,26	1,047	2,367	4,228	6,637	9,246	16,545

R45 SZERSZÁM

a_p [mm]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
f_a [mm/ford.]	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4	0,6
v_c [mm]	150	200	250	150	200	250	150	200	250	150
$R_{a,1}$ [μm]	0,66	0,67	0,61	1,05	0,78	0,46	1,02	0,84	1,13	2,26
$R_{a,2}$ [μm]	0,59	0,74	0,61	0,97	0,71	0,78	0,96	0,88	1,03	2,18
$R_{a,3}$ [μm]	0,56	0,65	0,58	1,04	0,71	0,69	0,87	0,89	0,92	2,28
$R_{a,\bar{a}}$ [μm]	0,603	0,686	0,600	1,020	0,733	0,643	0,950	0,870	1,026	2,240
$R_{z,1}$ [μm]	3,62	3,67	3,45	6,86	5,24	5,47	5,96	4,72	6,03	12,24
$R_{z,2}$ [μm]	3,44	3,65	3,39	6,85	5,23	5,28	5,84	4,59	5,50	11,30
$R_{z,3}$ [μm]	3,07	3,30	2,98	6,82	4,73	5,06	4,95	4,52	5,15	11,04
$R_{z,\bar{a}}$ [μm]	3,376	3,540	3,273	6,843	5,066	5,270	5,583	4,610	5,560	11,526
$R_{a,e}$	0,057	0,056	0,056	0,229	0,225	0,227	0,915	0,898	0,906	2,056
$R_{t,e}$	0,223	0,219	0,221	0,893	0,877	0,885	3,569	3,504	3,535	8,02

a_p [mm]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2
f_a [mm/ford.]	0,6	0,6	0,8	0,8	0,8	1	1	1	0,1	0,2
v_c [mm]	200	250	150	200	250	150	200	250	200	200
$R_{a,1}$ [μm]	2,03	2,25	4,23	3,70	3,79	5,01	4,96	5,13	0,68	0,74
$R_{a,2}$ [μm]	1,97	2,12	4,18	3,96	3,79	4,95	4,93	4,85	0,68	0,74
$R_{a,3}$ [μm]	1,92	2,08	3,98	3,70	3,84	4,91	4,97	5,08	0,68	0,71
$R_{a,\bar{a}}$ [μm]	1,973	2,150	4,130	3,786	3,806	4,956	4,953	5,020	0,680	0,730
$R_{z,1}$ [μm]	10,93	11,31	17,78	17,49	16,92	22,98	22,44	23,71	5,28	5,24
$R_{z,2}$ [μm]	10,35	10,70	17,71	17,35	16,92	22,85	22,43	21,97	5,24	5,15
$R_{z,3}$ [μm]	10,19	10,16	16,98	16,08	16,23	21,87	22,20	21,91	5,21	5,05
$R_{z,\bar{a}}$ [μm]	10,490	10,723	17,490	16,973	16,690	22,566	22,356	22,530	5,243	5,146
$R_{a,e}$	2,018	2,036	3,648	3,582	3,614	5,69	5,586	5,636	0,053	0,214
$R_{t,e}$	7,873	7,944	14,242	13,982	14,108	22,232	21,826	22,022	0,208	0,834

a_p [mm]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
f_a [mm/ford.]	0,4	0,6	0,8	1	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1
v_c [mm]	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
$R_{a,1}$ [μm]	0,97	2,02	3,77	5,48	0,61	0,68	0,93	2,14	3,81	4,36
$R_{a,2}$ [μm]	0,86	2,05	3,81	5,70	0,59	0,72	0,90	2,04	3,45	4,75
$R_{a,3}$ [μm]	0,89	1,92	3,78	5,51	0,59	0,72	0,93	2,04	3,40	4,13
$R_{a,\bar{a}}$ [μm]	0,906	1,996	3,786	5,563	0,596	0,706	0,920	2,073	3,553	4,413
$R_{z,1}$ [μm]	5,73	11,21	17,60	23,95	4,25	4,90	5,09	11,07	16,57	21,15
$R_{z,2}$ [μm]	5,21	10,03	17,22	23,14	4,16	4,83	4,94	10,88	16,07	20,77
$R_{z,3}$ [μm]	5,06	9,62	16,35	22,46	3,97	4,51	4,88	9,52	15,24	18,97
$R_{z,\bar{a}}$ [μm]	5,333	10,286	17,056	23,183	4,126	4,746	4,970	10,490	15,960	20,296
$R_{a,e}$	0,856	1,925	3,42	5,341	0,054	0,217	0,869	1,958	3,483	5,447
$R_{t,e}$	3,337	7,508	13,348	20,861	0,211	0,846	3,39	7,637	13,596	21,276

R50 SZERSZÁM

a_p [mm]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
f_a [mm/ford.]	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4	0,6
v_c [mm]	150	200	250	150	200	250	150	200	250	150
$R_{a,1}$ [μm]	0,63	0,53	0,34	0,45	0,39	0,34	0,94	0,93	0,73	2,53
$R_{a,2}$ [μm]	0,64	0,46	0,34	0,44	0,39	0,34	0,96	0,90	0,68	2,63
$R_{a,3}$ [μm]	0,65	0,47	0,33	0,48	0,36	0,32	0,95	0,87	0,71	2,44
$R_{a,\bar{a}}$ [μm]	0,640	0,486	0,336	0,456	0,380	0,333	0,950	0,900	0,706	2,533
$R_{z,1}$ [μm]	4,16	3,46	2,62	3,91	3,21	2,24	5,13	4,79	4,16	11,25
$R_{z,2}$ [μm]	4,07	2,91	2,77	3,51	3,40	2,12	4,89	4,66	4,21	11,69
$R_{z,3}$ [μm]	4,36	2,74	2,86	4,05	2,66	2,08	5,08	4,50	3,95	11,31
$R_{z,\bar{a}}$ [μm]	4,196	3,036	2,750	3,823	3,090	2,146	5,033	4,650	4,106	11,416
$R_{a,e}$	0,065	0,065	0,065	0,257	0,258	0,258	1,05	1,051	1,052	2,38
$R_{t,e}$	0,254	0,254	0,254	1,005	1,006	1,007	4,093	4,099	4,104	9,286

a_p [mm]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
f_a [mm/ford.]	0,6	0,6	0,8	0,8	0,8	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8
v_c [mm]	200	250	150	200	250	200	200	200	200	200
$R_{a,1}$ [μm]	2,01	2,28	3,72	4,75	3,65	0,59	0,36	0,88	2,35	3,71
$R_{a,2}$ [μm]	1,91	2,33	3,53	3,99	3,64	0,56	0,35	0,88	2,34	4,42
$R_{a,3}$ [μm]	1,91	2,38	3,54	3,93	3,66	0,52	0,35	0,89	2,36	3,61
$R_{a,\bar{a}}$ [μm]	1,943	2,330	3,596	4,223	3,650	0,556	0,353	0,883	2,350	3,913
$R_{z,1}$ [μm]	9,86	10,54	16,36	19,59	16,58	4,03	2,72	4,51	10,91	18,74
$R_{z,2}$ [μm]	9,36	10,84	16,24	17,73	16,52	3,96	2,42	4,42	12,26	17,34
$R_{z,3}$ [μm]	8,94	10,71	15,89	18,80	16,51	3,80	3,03	4,81	10,45	17,09
$R_{z,\bar{a}}$ [μm]	9,386	10,696	16,163	18,706	16,536	3,930	2,723	4,580	11,206	17,723
$R_{a,e}$	2,464	2,384	4,372	4,387	4,379	0,065	0,258	1,054	2,387	4,395
$R_{t,e}$	9,614	9,3	17,068	17,127	17,097	0,255	1,009	4,11	9,314	17,157

a_p [mm]	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
f_a [mm/ford.]	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8
v_c [mm]	200	200	200	200	200
$R_{a,1}$ [μm]	0,55	0,38	0,99	2,09	3,52
$R_{a,2}$ [μm]	0,51	0,35	0,99	2,01	4,28
$R_{a,3}$ [μm]	0,53	0,36	0,95	2,16	3,59
$R_{a,\bar{a}}$ [μm]	0,530	0,363	0,976	2,086	3,796
$R_{z,1}$ [μm]	3,79	2,56	4,73	10,53	17,16
$R_{z,2}$ [μm]	3,96	2,70	4,79	11,30	15,82
$R_{z,3}$ [μm]	3,81	2,28	5,05	11,24	16,42
$R_{z,\bar{a}}$ [μm]	3,853	2,513	4,856	11,023	16,466
$R_{a,e}$	0,065	0,259	1,057	2,394	4,41
$R_{t,e}$	0,256	1,011	4,122	9,341	17,219

CNMG SZERSZÁM

a_p [mm]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
f_a [mm/ford.]	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4	0,6
v_c [mm]	200	250	300	200	250	300	200	250	300	200
$R_{a,1}$ [μm]	0,49	0,48	0,51	0,96	0,99	0,94	3,36	2,97	3,24	6,68
$R_{a,2}$ [μm]	0,49	0,48	0,52	0,99	0,92	0,93	3,27	3,09	3,22	6,49
$R_{a,3}$ [μm]	0,48	0,47	0,51	0,94	1,02	0,93	3,27	3,08	3,11	6,57
$R_{a,\hat{a}}$ [μm]	0,486	0,476	0,513	0,963	0,976	0,933	3,300	3,046	3,190	6,580
$R_{z,1}$ [μm]	2,01	1,93	2,02	4,44	4,77	4,71	13,52	12,61	13,09	25,74
$R_{z,2}$ [μm]	1,91	1,93	2,01	5,00	4,42	4,55	13,44	12,38	12,90	25,54
$R_{z,3}$ [μm]	1,76	1,85	2,03	4,46	4,84	4,73	13,35	12,61	12,71	25,67
$R_{z,\hat{a}}$ [μm]	1,893	1,903	2,020	4,633	4,676	4,663	13,436	12,533	12,900	25,650
$R_{a,e}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$R_{t,e}$	1,05	1,05	1,05	4,205	4,205	4,205	16,912	16,912	16,912	38,402

a_p [mm]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2
f_a [mm/ford.]	0,6	0,6	0,8	0,8	0,8	1	1	1	0,1	0,2
v_c [mm]	250	300	200	250	300	200	250	300	250	250
$R_{a,1}$ [μm]	6,69	6,68	10,66	10,15	9,93	12,83	13,29	13,85	0,51	0,92
$R_{a,2}$ [μm]	6,65	6,71	10,78	9,96	9,54	13,51	13,56	13,63	0,50	0,91
$R_{a,3}$ [μm]	6,86	6,74	10,53	9,85	9,69	13,09	13,35	13,72	0,52	0,93
$R_{a,\hat{a}}$ [μm]	6,733	6,710	10,656	9,986	9,720	13,143	13,400	13,733	0,510	0,920
$R_{z,1}$ [μm]	26,08	16,47	40,37	38,83	37,95	50,70	51,81	51,94	2,18	4,58
$R_{z,2}$ [μm]	26,16	26,61	40,15	38,59	38,05	50,86	52,27	52,04	2,32	4,44
$R_{z,3}$ [μm]	26,55	26,83	40,52	38,83	38,41	50,63	51,47	52,79	2,28	4,50
$R_{z,\hat{a}}$ [μm]	26,263	23,303	40,346	38,750	38,136	50,730	51,850	52,256	2,260	4,506
$R_{a,e}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$R_{t,e}$	38,402	38,402	69,179	69,179	69,179	110,037	110,037	110,037	1,05	4,205

a_p [mm]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
f_a [mm/ford.]	0,4	0,6	0,8	1	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1
v_c [mm]	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250
$R_{a,1}$ [μm]	3,33	7,14	10,42	13,88	0,53	0,94	2,99	7,02	10,32	13,57
$R_{a,2}$ [μm]	3,35	7,13	10,43	14,12	0,54	0,91	3,00	6,90	10,10	13,79
$R_{a,3}$ [μm]	3,38	7,12	10,34	13,44	0,56	0,92	3,02	6,94	10,38	13,52
$R_{a,\hat{a}}$ [μm]	3,353	7,130	10,396	13,813	0,543	0,923	3,003	6,953	10,266	13,626
$R_{z,1}$ [μm]	13,76	27,21	40,95	53,14	2,18	4,56	12,82	26,83	39,55	54,22
$R_{z,2}$ [μm]	13,60	27,38	40,06	52,53	2,14	4,40	12,51	26,93	41,07	52,68
$R_{z,3}$ [μm]	13,67	27,24	40,44	51,67	2,23	4,59	12,79	26,77	40,01	52,50
$R_{z,\hat{a}}$ [μm]	13,676	27,276	40,483	52,446	2,183	4,516	12,706	26,843	40,210	53,133
$R_{a,e}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$R_{t,e}$	16,912	38,402	69,179	110,037	1,05	4,205	16,912	38,402	69,179	110,037

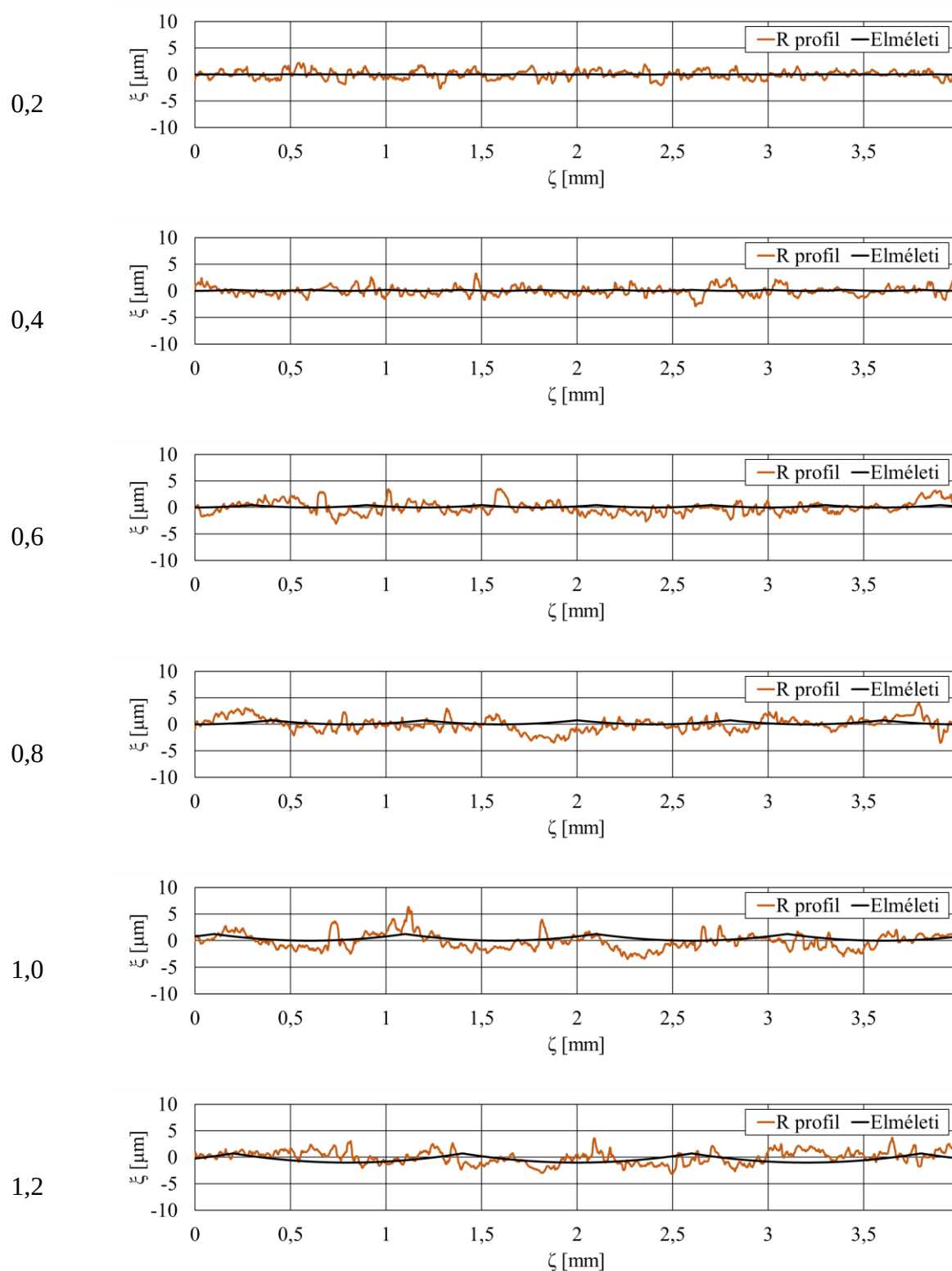
M.4. Az elméleti és a mért érdességi profilok összehasonlítása

R13 SZERSZÁM

($a_p = 0,1 \text{ mm}$, $v_c = 250 \text{ m/min}$)

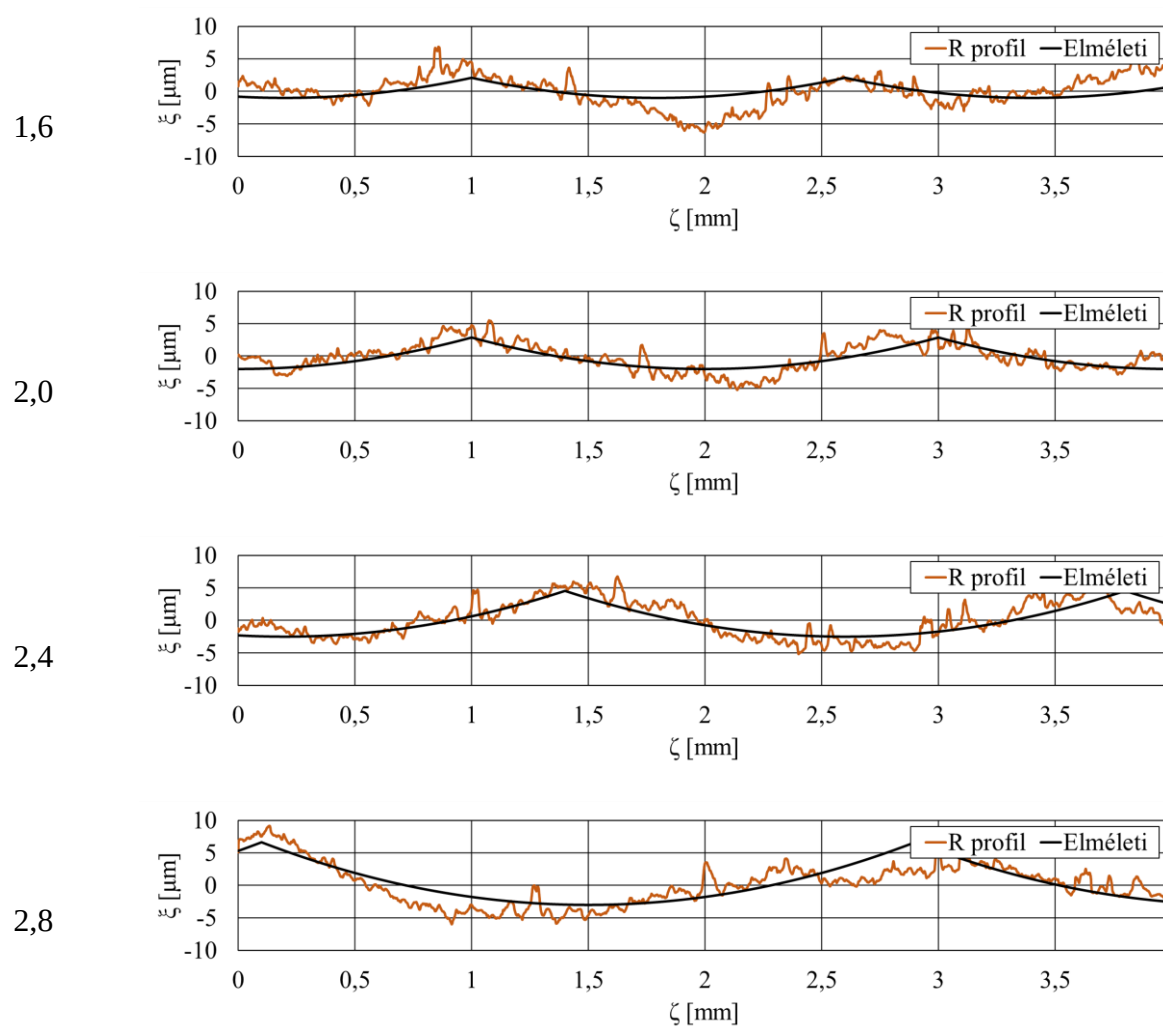
f_a
[mm/ford.]

A mért R-profil és az elméleti érdeség profil



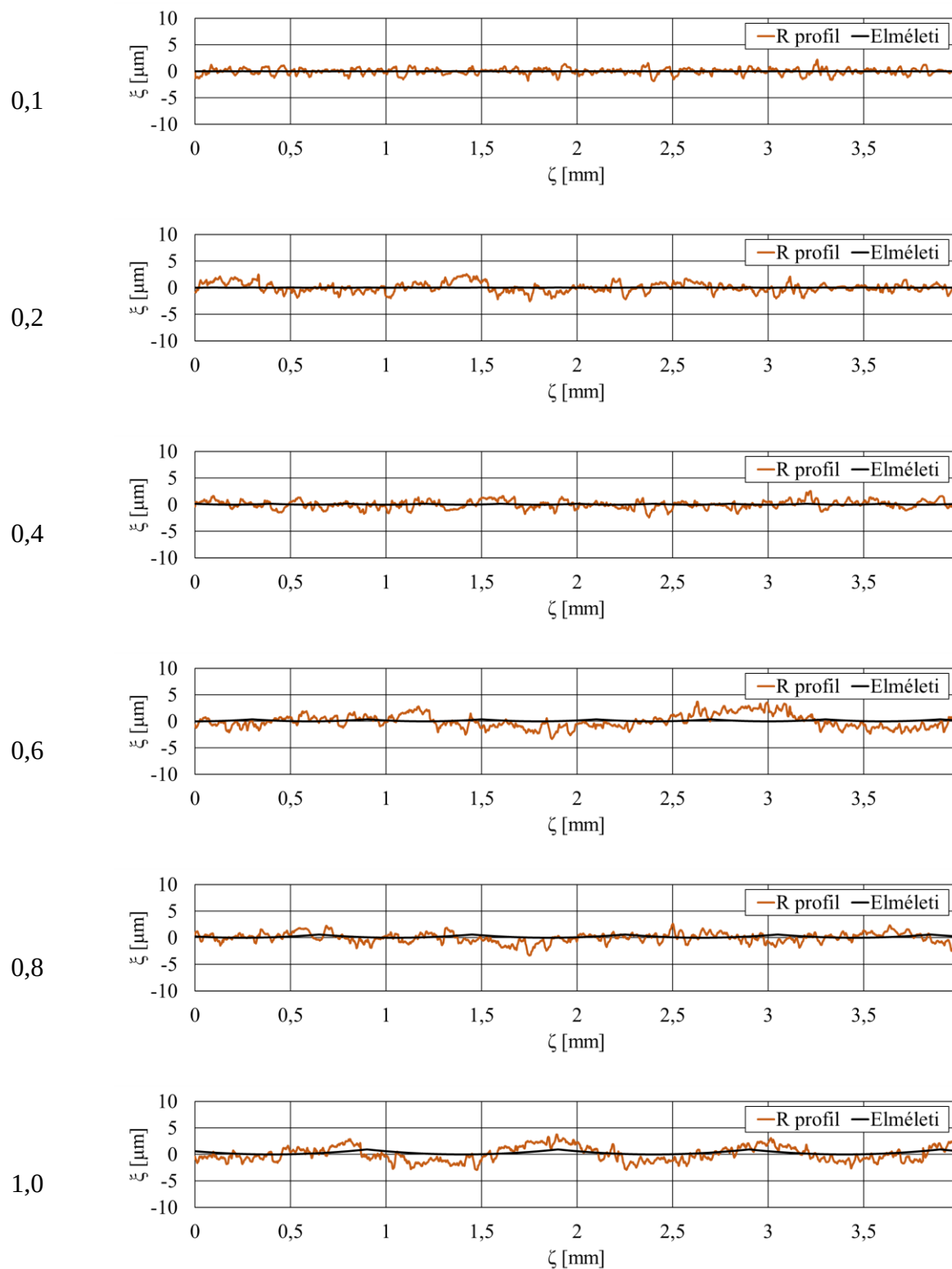
f_a
[mm/ford.]

A mért R-profil és az elméleti érdeség profil



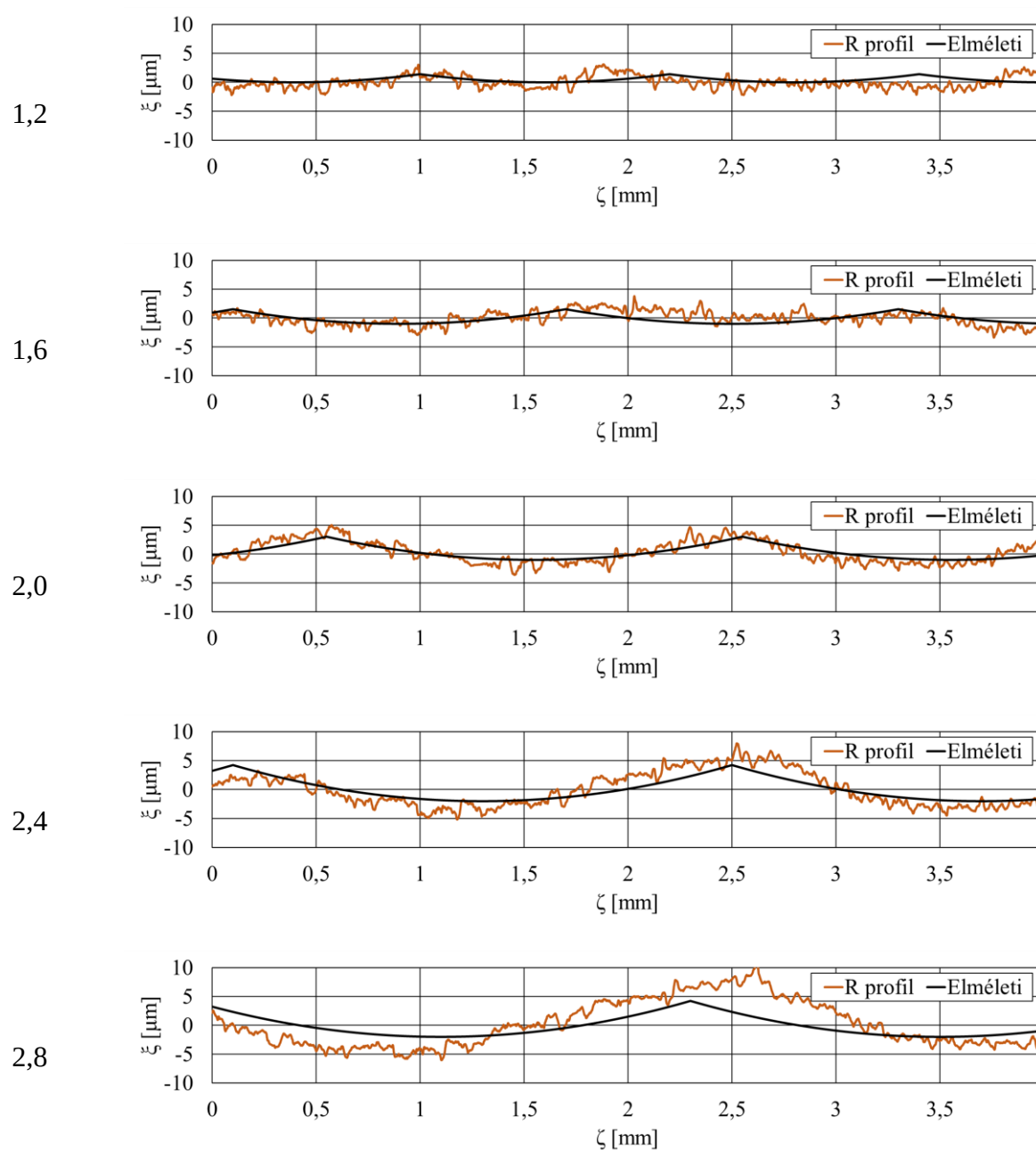
R15 SZERSZÁM $(a_p = 0,1 \text{ mm}, v_c = 250 \text{ m/min})$ f_a
[mm/ford.]

A mért R-profil és az elméleti érdeség profil



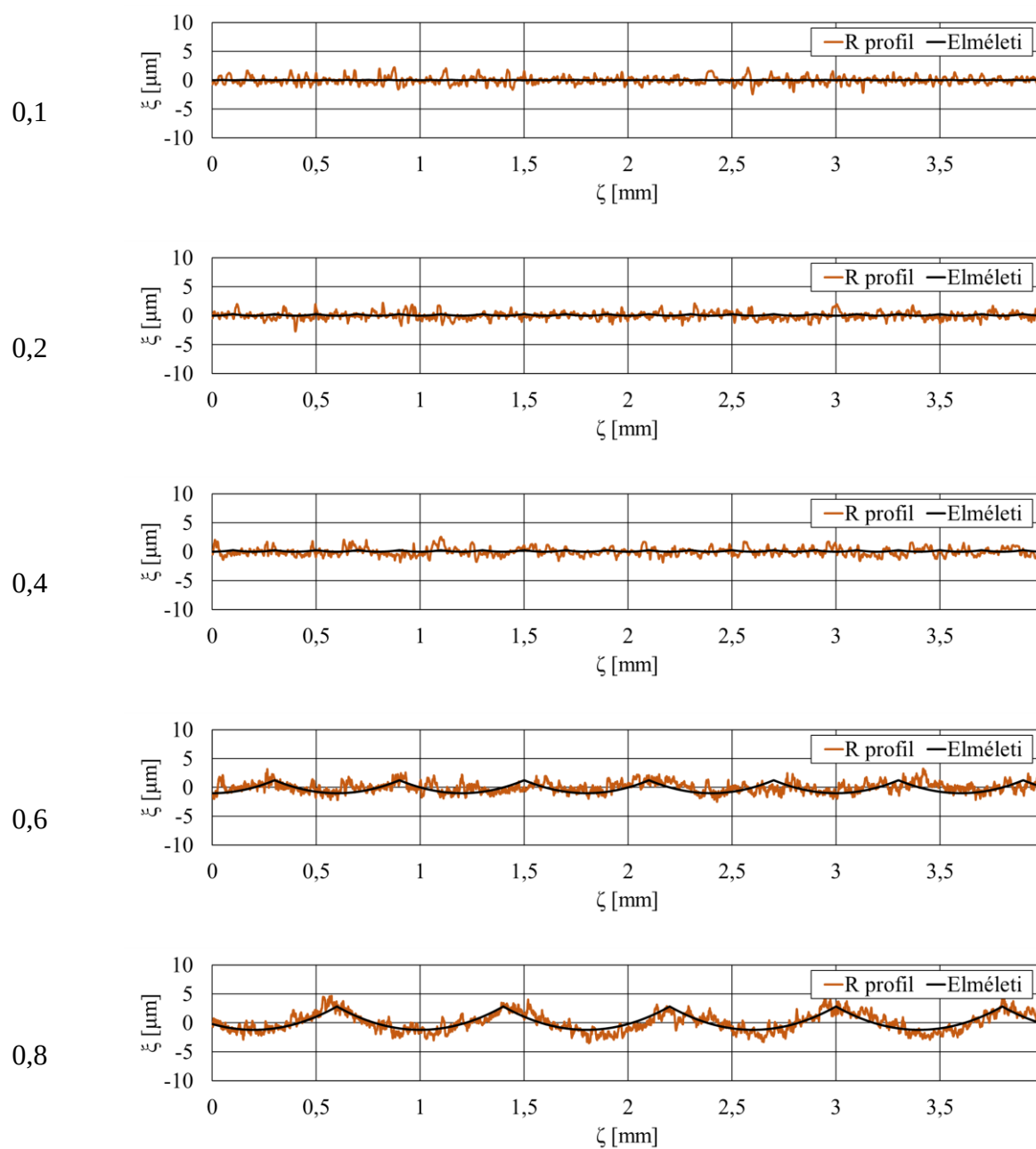
f_a
[mm/ford.]

A mért R-profil és az elméleti érdeség profil



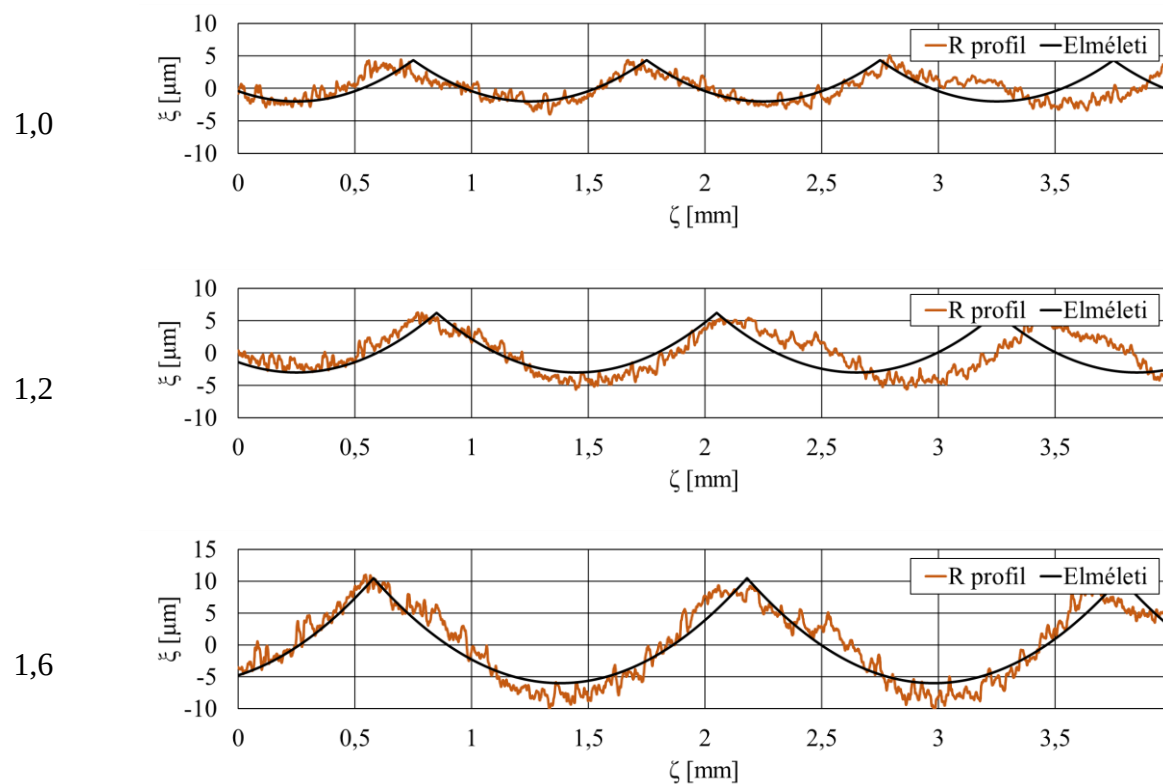
R30 SZERSZÁM $(a_p = 0,1 \text{ mm}, v_c = 200 \text{ m/min})$ f_a
[mm/ford.]

A mért R-profil és az elméleti érdeség profil



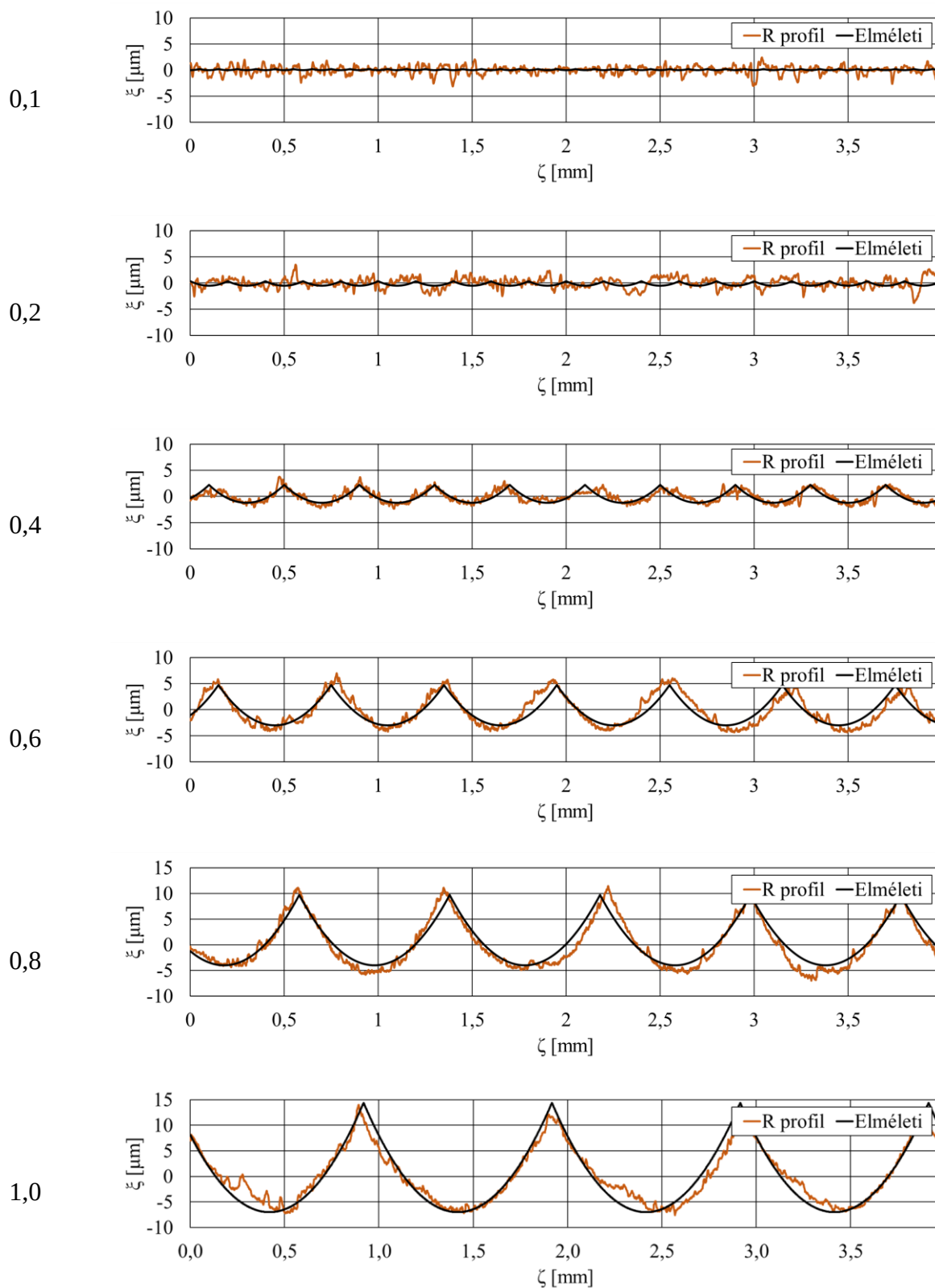
f_a
[mm/ford.]

A mért R-profil és az elméleti érdeség profil



R45 SZERSZÁM $(a_p = 0,1 \text{ mm}, v_c = 200 \text{ m/min})$ f_a
[mm/ford.]

A mért R-profil és az elméleti érdeség profil



R50 SZERSZÁM $(a_p = 0,1 \text{ mm}, v_c = 200 \text{ m/min})$ f_a
[mm/ford.]

A mért R-profil és az elméleti érdeség profil

