

A Miskolci Egyetem Habilitációs Füzetek

KEMÉNYMEGMUNKÁLÓ ELJÁRÁSOK
HATÉKONYSÁGA ÉS A MEGMUNKÁLT FELÜLET
MINŐSÉGE

Tudományos munkásság áttekintő összefoglalása

Írta:

Dr. Molnár Viktor,

aki a Gépészeti Tudományok tudományágban „dr. habil.” cím
elnyerésére pályázik

Miskolc

2022

TARTALOM

1	Bevezetés	1
2	Anyagleválasztási hatékonyság	3
2.1	Furatgeometria hatása az anyagleválasztási sebességre.....	4
2.2	Eljárásválasztás adott furatgeometriai paraméterek esetén.....	9
2.3	A marás forgácsolási adatainak hatása az anyagleválasztási sebességre	13
2.4	Saját munka és tézisek.....	15
2.4.1	Saját munka	15
2.4.2	A saját munka alapján megfogalmazott tézisek	16
3	A 3D-s felületi topográfia mérés módszertani vizsgálata	17
3.1	Minimális kiértékelési terület meghatározása az érdességi paraméterek szórása alapján referencia határértékek segítségével.....	17
3.2	Minimális kiértékelési terület meghatározása regresszióelemzéssel	20
3.3	A minimális kiértékelési terület valószínűségi vizsgálata	23
3.4	A 2D-s és 3D-s érdességi paraméter értékek eltérései	28
3.5	Saját munka és tézisek.....	29
3.5.1	Saját munka	29
3.5.2	A saját munka alapján megfogalmazott tézisek	30
4	Keménymegmunkált felületek funkcionális sajátosságai	31
4.1	Eljárási sorrendváltozatok a felületek funkcionális tulajdonságait jellemző topográfiai paraméterek alapján.....	31
4.2	Forgácsolási adatok hatása a funkcionális tulajdonságokat meghatározó topográfiai paraméterekre	35
4.3	A megmunkált felületek funkcionális sajátosságait jellemző paraméterek közötti összefüggések	39
4.4	A felületi aszimmetria, mint kedvező tulajdonság a felület funkcionalitása szempontjából	40
4.5	Saját munka és tézisek.....	43
4.5.1	Saját munka	43
4.5.2	A saját munka alapján megfogalmazott tézisek	43
	Összefoglalás	45
	Summary	46
	Hivatkozott saját publikációk	47
	Felhasznált irodalom	48

1 BEVEZETÉS

A gépipari alkatrészek gyártástechnológiájának és gyártási folyamatának minősége napjainkban különös körültekintést igényel. Többek között az autópárban, a nagy darabszámban gyártott alkatrészek esetén az egy alkatrész megmunkálása során nyert minimális idő a teljes sorozat gyártásában, illetve éves szinten összességében lényegesen nagy időmegtakarítást jelent, ami költségcsökkenéshez vezethet. Emiatt kiemelt fontosságú az iparban a termelékenység hatékonyságának a fokozása nem csak az új technológiák alkalmazásával, hanem a megmunkálás paramétereinek optimalizálásával is.

A közvetlenül a forgácsoláshoz tartozó idők minimalizálásán túl további időcsökkentést jelent a nem forgácsoláshoz tartozó idők – mint például az előkészítési-befejezési vagy a mellékidők – csökkentése. A teljes gyártási folyamat egyik lényeges eleme azon mérések ideje, amelyek nem, vagy csak korlátozottan párhuzamosíthatóak a megmunkálási folyamattal. Ilyenek például a viszonylag hosszú időt igénylő mérőszobai mérések, illetve az első mintázás. A 3D-s felületi topográfia mérése és elemzése tipikusan hosszú folyamat, alkalmazása azonban sok esetben ma már elengedhetetlen.

A költségek csökkentésének másik nagy területe a selejtarány csökkentése. Ennek érdekében az alkatrészeket és azok felületeinek megmunkálását úgy kell megtervezni, hogy a visszahívás, illetve a javítás minimális mértékű legyen. A megmunkált felület minőségének egyik lényeges összetevője az alkatrész funkcionális követelményeihez tartozó tulajdonságok összessége, amit már a technológia megtervezésénél szabályozni lehet.

A PhD fokozatszerzést követően ezen három fő terület kutatásával foglalkoztam. Vizsgáltam autópárban nagyobb tömegben gyártott alkatrészek (pl. fogaskerekek) megmunkálási hatékonyságát a technológiai paraméterek szabályozása szintjén. A kutatások középpontjában az anyagleválasztási sebesség vizsgálata állt. Ezt követően a megmunkált felület minősége témában végeztem vizsgálatokat. Módszereket dolgoztam ki a 3D-s felületi topográfia mérés kapcsán a szabványban nem szabályozott, minimálisan szükséges kiértékelési terület nagyságának a meghatározására. A kutatásaim harmadik meghatározó területe a megmunkált felületek működési tulajdonságaihoz kapcsolódik. Keménysztergálással és köszörüléssel megmunkált edzett felületek kopásállóságot és kenőanyag-megtartó képességet jellemző topográfiai paraméterek vizsgálatával, azok összefüggéseivel és megbízhatóságával foglalkoztam (1. táblázat).

A kutatásaim eredményeit nemzetközi konferenciákon és tanulmányutakon vitattam meg és folyóiratokban publikáltam. Az eredmények folyamatosan beépítésre kerülnek a gépészmérnöki alap- és mesterszak tantárgyainak tananyagaiba (pl. precíziós megmunkálások, minőség-ellenőrzés).

A kutatási tevékenységemhez és annak eredményeihez nagyban hozzájárult prof. dr. Kundrák János, mint szakmai mentor, a ZF Járműgyártási Szakcsoporthoz és a Precíziós Megmunkálások kutatócsoporthoz tartozó munkatársak.

1. táblázat: Kutatási területek a PhD fokozatszerzést követően

Kutatási terület	Év								
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Anyagleválasztási hatékonyság									
A 3D-s felületi topográfia mérés módszertani vizsgálata									
Keménymegmunkált felületek funkcionális sajátosságai									

A tézisfüzet a fent bevezetett három kutatási témában vizsgált és publikált eredményeimet foglalja össze három fő fejezetben, amelyek sorrendje a kutatások időbeliségét tükrözi. A fő fejezetek végén a témához kapcsolódó elvégzett saját munkáim, illetve eredményeim fogalmaztam meg összefoglaló tézisek formájában.

2 ANYAGLEVÁLASZTÁSI HATÉKONYSÁG

Edzett alkatrészek felületeit korábban köszörüléssel megmunkálták meg [1, 2], de a köszörüléssel megegyező felületminőség létrehozása olyan eljárásokkal is megvalósítható, mint például a keményesztergálás [3, 4]. A technológiai fejlődés miatt az alkatrészek működési tulajdonságai javulnak, miközben a gyártás gazdaságossága is javul. Az eljárások összehasonlítására végzett elemzésekben többnyire a hagyományosnak tekinthető köszörülést tekintik az összehasonlítás alapjának, és ehhez képest vizsgálják az újabb eljárásokat. A keményesztergálás vizsgálatokor [5] az egyik legfontosabb tényező, hogy a köszörüléssel azonos felületi érdesség és pontosság érhető-e el [6, 7], illetve hogy a felületi integritás megfelelő-e [8, 9].

Ha a felületek működési tulajdonságai, azon belül az egymáson elmozduló felületek sajátosságait elemezzük, vannak olyan esetek, amikor a követelmények elsősorban a felület periodikus jellege miatt nem teljesíthetők (pl. esztergálásnál). Köszörülésnél a megmunkált felület random topográfiát eredményez. A periodikusság elkerülésére érdemes olyan eljárást választani, amelyben a két különböző eljárás előnyei egyesíthetők. Ezt kombinált eljárásnak nevezzük, amelyben a nagyoló keményesztergálást köszörülés követi, mint simító megmunkálás [2, 10, 11]. Ezzel az eljárással nemcsak a felületi topográfia lehet megfelelő, hanem az anyagleválasztás hatékonysága is növelhető.

A Gyártástudományi Intézet egyik fő kutatási vonala a keménymegmunkáló eljárásokkal megmunkált felület létrehozásának hatékonysága. Erre elemeztük a megmunkáláshoz, illetve a gyártáshoz tartozó jellemző időparamétereket (gépi főidő, mellékidő, alapidő, műveleti idő stb.), a felületképzési sebességet és az anyagleválasztási sebességet. Az utóbbi kettő vonatkozásában bevezetésre került a paraméterek ún. gyakorlati értéke, ami annyiban tér el az elméleti értéktől, hogy az időegységet nem a gépi főidőre vonatkoztatjuk (a szerszámgyártók ezt az elméleti paramétert adják meg a szerszámok teljesítményének jellemzésére), hanem más, a teljes gyártási sorozatot jellemző időre. Mi elsősorban a műveleti időt vettük alapul a vizsgálatainkban, hisz az az előkészületi- és befejezési időtől kezdve a gépi főidőig a teljes gyártott sorozat időráfordítását megadja.

Az anyagleválasztás hatékonyságának néhány fontosabb vizsgálati területei a kutatócsoporton belül:

- A keményesztergálás és a kombinált eljárás időparamétereinek összehasonlítása a köszörülés időparamétereivel.
- Az elméleti és a bevezetett gyakorlati felületképzési és anyagleválasztási sebesség összehasonlító vizsgálata keménymegmunkálás és marás esetén.
- A forgácsolási adatok hatása a felületképzési és anyagleválasztási sebesség elméleti és gyakorlati értékeire keménymegmunkálás és marás esetén.

- A megmunkált felület geometriai paramétereinek hatása a felületképzési és anyagleválasztási sebesség elméleti és gyakorlati értékeire keménymegmunkálás esetén.

A továbbiakban belső hengeres felületek átmérőjének és hosszának, illetve a marás technológiai paramétereinek az anyagleválasztási sebességre gyakorolt hatása vizsgálatának eredményeit részletezem.

2.1 Furatgeometria hatása az anyagleválasztási sebességre

Fogaskerék furatgeometriájának a megmunkálás hatékonyságra gyakorolt hatásainak vizsgálatához végzett kísérletekben a 2. táblázatban összefoglalt forgácsolási adatokat vettük alapul, mely adatok üzemi körülmények között gyártott alkatrészekre vonatkoznak. Vizsgálatainkban 20MnCr5 betétedzett acél forgácsolásának hatékonysági paramétereit elemeztük. Az anyag keménysége a hőkezelés után 62±2 HRC. Ennek megfelelően kerültek megválasztásra a forgácsolási paraméter értékek. Három eljárásváltozatot vizsgáltunk: hosszölöléses köszörülés (P1), keménysztergálás (P2) és kombinált eljárás (P3/1: keménysztergálás nagyoló és simító fokozatban, P3/2: beszűrő köszörülés nagyoló és simító fokozatban).

2. táblázat: Eljárásváltozatok és technológiai adatok

P1	P2	P3/2
$n_{k,N}$: 40 k.ford/min	$a_{p,N}$: 0,25 mm	v_c : 40 m/s
$n_{k,S}$: 36 k.ford/min	$a_{p,S}$: 0,05 mm	v_w : 86 m/min
v_w : 13,6 m/min	f_N : 0,15 mm/ford	$v_{FR,N}$: 0,005 mm/s
$a_{e,N}$: 0,01 mm/k.ford	f_S : 0,08 mm/ford	$v_{FR,S}$: 0,0033 mm/s
$a_{e,S}$: 0,001 mm/k.ford	v_c : 180 m/min	$v_{FR,L}$: 0,1 mm/s
$v_{FL,N}$: 2200 mm/min	P3/1	Z_N : 0,04 mm
$v_{FL,S}$: 2000 mm/min	a_p : 0,25 mm	Z_S : 0,01 mm
$i_{kiszikr.}$: 16	f : 0,15 mm/ford	Z_A : 0,27 mm
	v_c : 180 m/min	$t_{kiszikr.}$: 5s

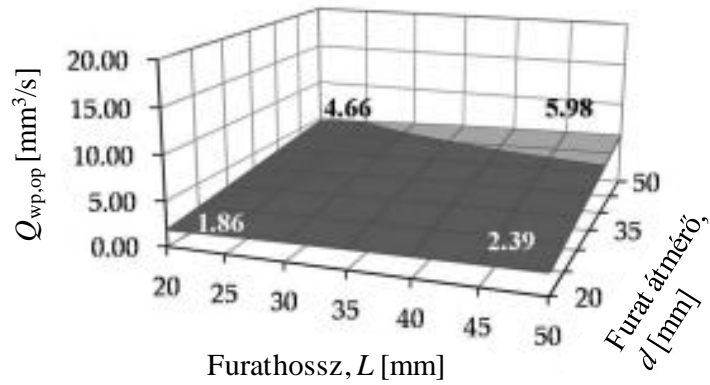
N: nagyolás, S: simítás, k: korong

Az anyagleválasztási sebesség műveleti idő (T_{op}) alapján számított gyakorlati értéke a furatra:

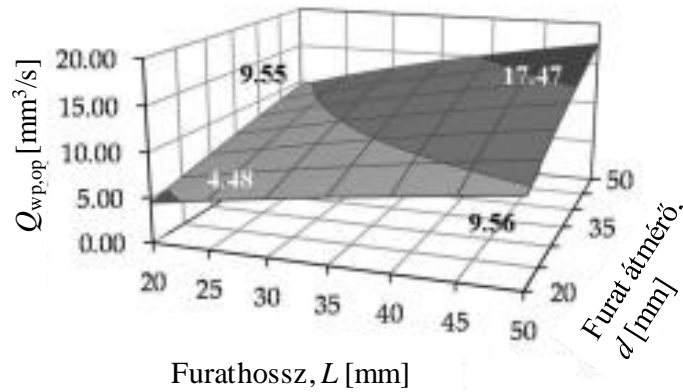
$$Q_{wp,op} = \frac{Ld\pi Z}{60T_{op}}, \quad (1)$$

ahol L a furathossz, d a furat átmérő, Z a ráhagyás.

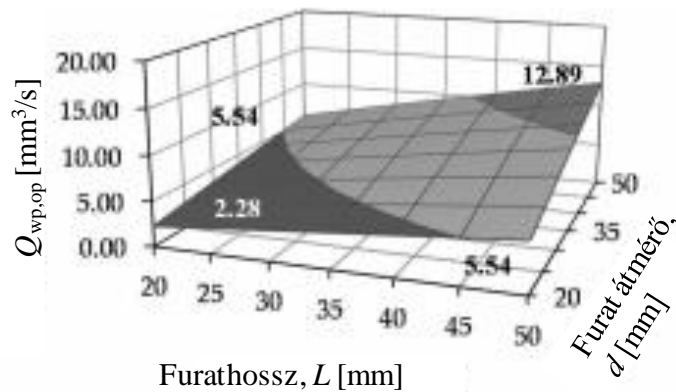
A három eljárás gyakorlati anyagleválasztási sebességeit az 1-3. ábrák foglalják össze.



1. ábra: A műveleti idő alapú anyagleválasztási sebesség gyakorlati értékei különböző furathosszak és furatátmérők mellett hosszölötölésos köszörülés (P1) esetén



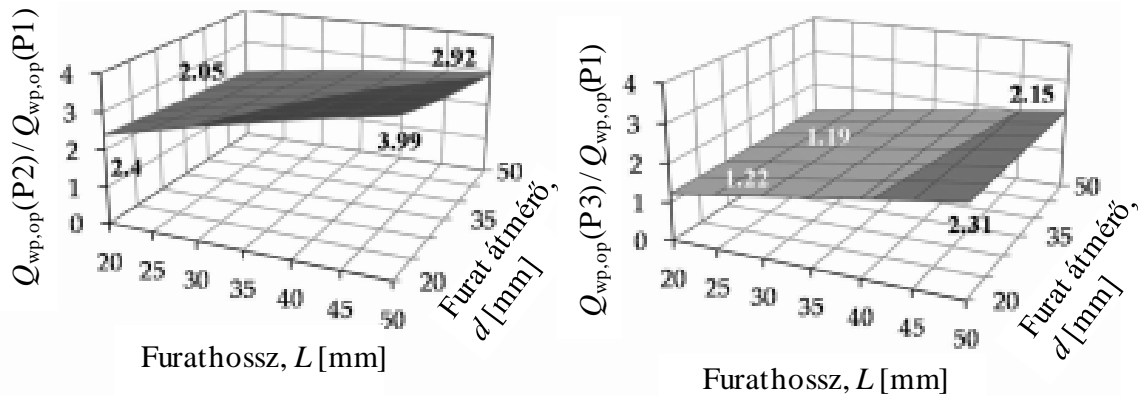
2. ábra: A műveleti idő alapú anyagleválasztási sebesség gyakorlati értékei különböző furathosszak és furatátmérők mellett keménysztergálás (P2) esetén



3. ábra: A műveleti idő alapú anyagleválasztási sebesség gyakorlati értékei különböző furathosszak és furatátmérők mellett kombinált eljárás (P3) esetén

Mindkét eljárásnál egyértelmű a különbség, azaz a gyakorlati anyagleválasztási sebesség értéke a keménysztergálásnál meghaladja a kombinált eljárásét, de a kombinált eljárás értéke lényegesen jobb, mint a köszörülésé. Bár a gyakorlati anyagleválasztási sebesség a legmagasabb a keménysztergálásnál, az alkatrész működési körülményei megkövetelhetik az kombinált eljárás alkalmazását.

Az 1-3. ábrákon látható, hogy úgy az átmérő, mint a furat hosszának növelésével az anyagleválasztási sebesség gyakorlati értéke nő. Keménysztergálásnál, amikor a furathossz és az átmérő 20 és 50 mm közötti, a $Q_{wp,op}$ értékek 4,48 és 17,47 mm³/s között alakulnak. A kombinált eljárásnál ezek az értékek 2,33 és 13,12 mm³/s közöttiek. A 4. ábrán a $Q_{wp,op}$ értékek aránya látható a köszörüléshez (P1) képest a másik két vizsgált eljárásváltozat (P2, P3) esetén.



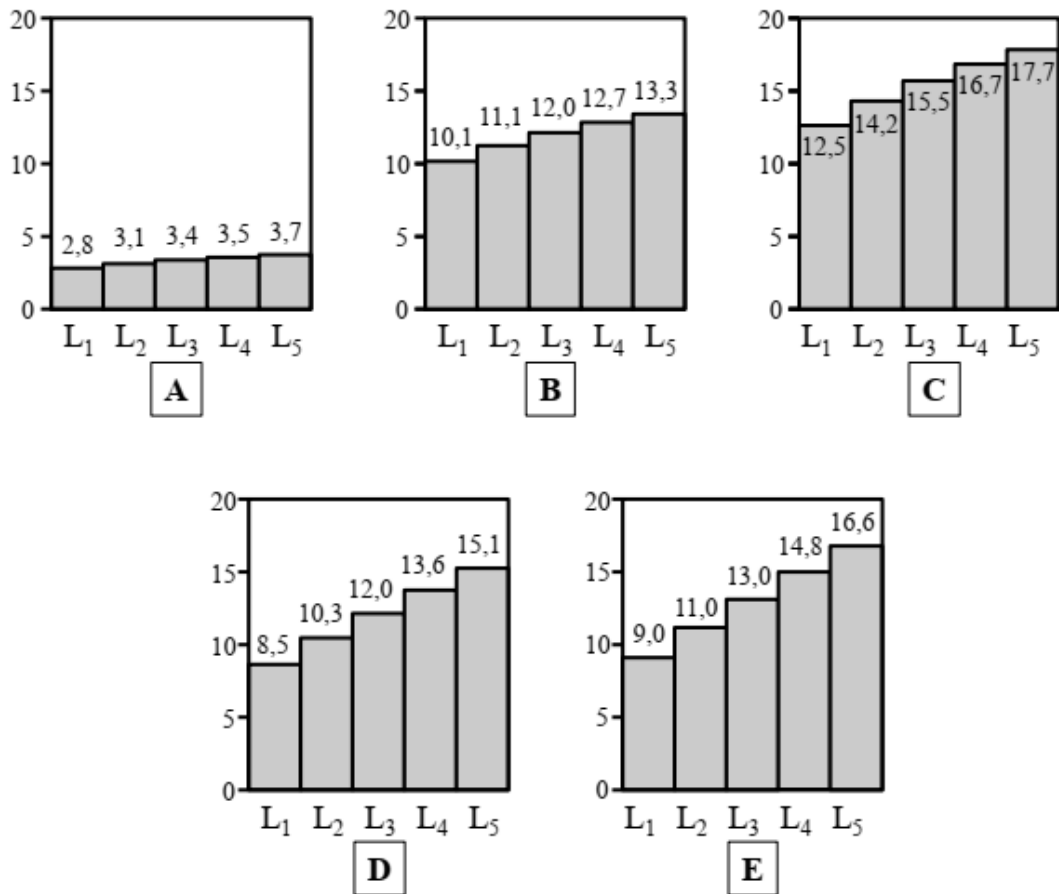
4. ábra: A műveleti idő alapú anyagleválasztási sebesség gyakorlati értékeinek arányai a hosszeltolós köszörülést bázisnak tekintve (a) keménysztergálás és (b) kombinált eljárás esetén

Keménysztergálásnál a gyakorlati anyagleválasztási sebesség értékei 2,05-3,99-szer nagyobbak a köszörülés ezen értékeihez képest. A kombinált eljárásnál ezek az értékek 1,25 és 2,36 között alakulnak. A gyakorlati anyagleválasztási sebesség vizsgálatán alapuló módszer alkalmazása támogathatja a konstrukciós tervezést.

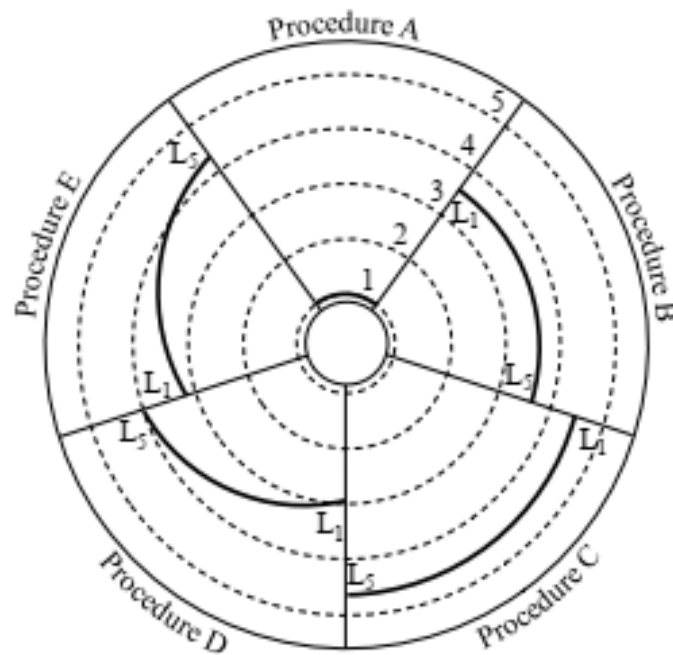
Egy következő vizsgálatban a fent leírt technológiai adatokat vettük alapul. A furatgeometriát változtattuk: 30 mm hosszú furatot vizsgáltunk öt különböző átmérő mellett (d : 35, 50, 65, 80, 95 mm), majd 80 mm átmérőjű furatot öt különböző hosszúság mellett (L : 20, 25, 30, 35, 40 mm). Az A eljárásváltozat a hosszeltolós köszörülés, a B és C változat a keménysztergálás, de a C változatban wiper lapkát alkalmaztunk A D és E változat a kombinált eljárás, az E változat keménysztergálási részében wiper lapkát alkalmaztunk. A wiper lapkával az előtolás nagyságában lehetett változást eszközölni: nagyoló fokozatban ennek értéke 0,24 mm/ford, simító fokozatban 0,12 mm/ford.

A furathossz hatása:

Az időegység alatt eltávolítható anyagterefogat gyakorlati értékei ($Q_{wp,op}$) egy művelet során kis furathossznál 10-nél nagyobbak a B és a C eljárásváltozatnál, míg nagyobb furathossznál a C (17,7) és az E (16,6) eljárásváltozat kedvező (5. ábra).



5. ábra: A műveleti idő alapú anyagválasztási sebesség gyakorlati értékei különböző furathosszak mellett

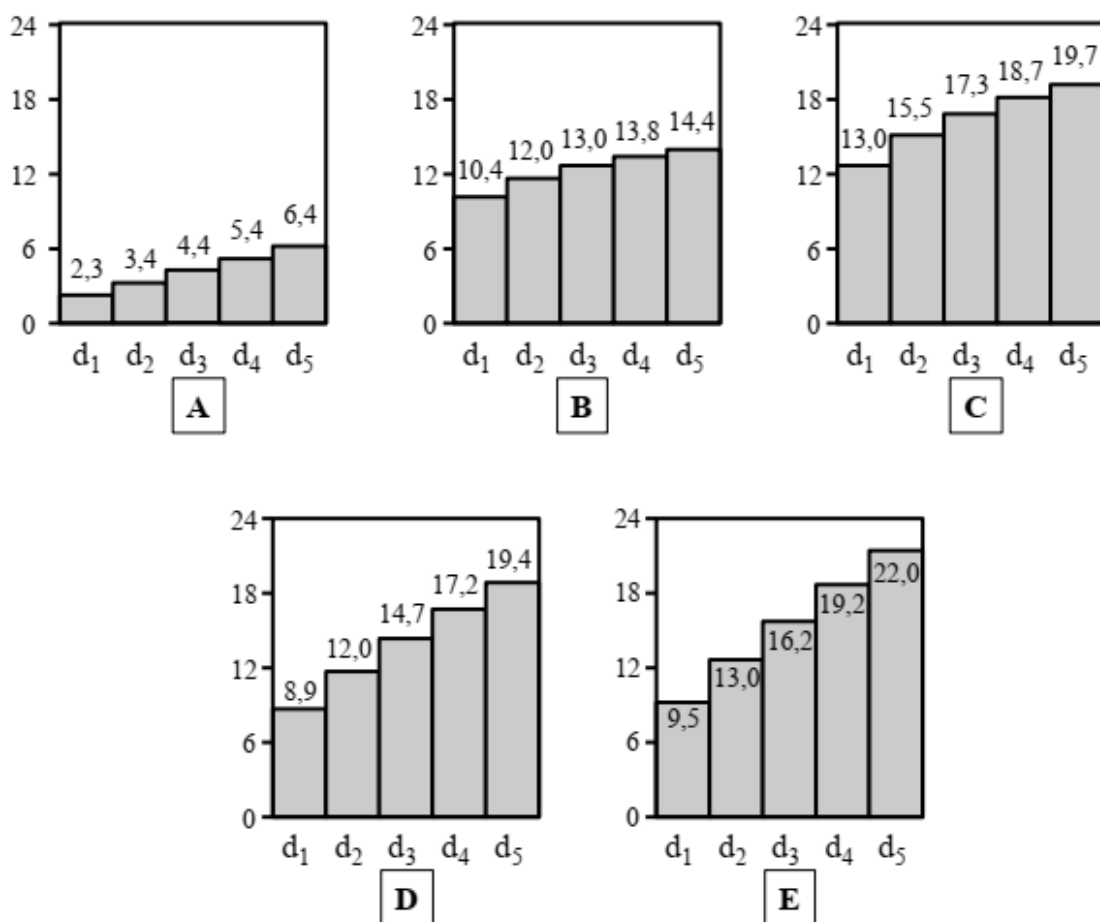


6. ábra: A műveleti idő alapú anyagválasztási sebesség aránya a hosszeltolások közörlését bázisnak tekintve különböző furathosszak mellett

Vizsgáltuk az anyagleválasztási sebesség arányát a köszörüléséhez képest. Az értékeket a 6. ábra mutatja be. Megfigyelhető, hogy míg a kombinált eljárásoknál a furathossz növelésének hatása az arányokra (D/A: 3,0...4,1; E/A: 3,2...4,5) jelentősnek ítéltető, addig a keménysztergálásnál gyakorlatilag állandó (B/A: 3,6; C/A: 4,6...4,8).

A furatátmérő hatása:

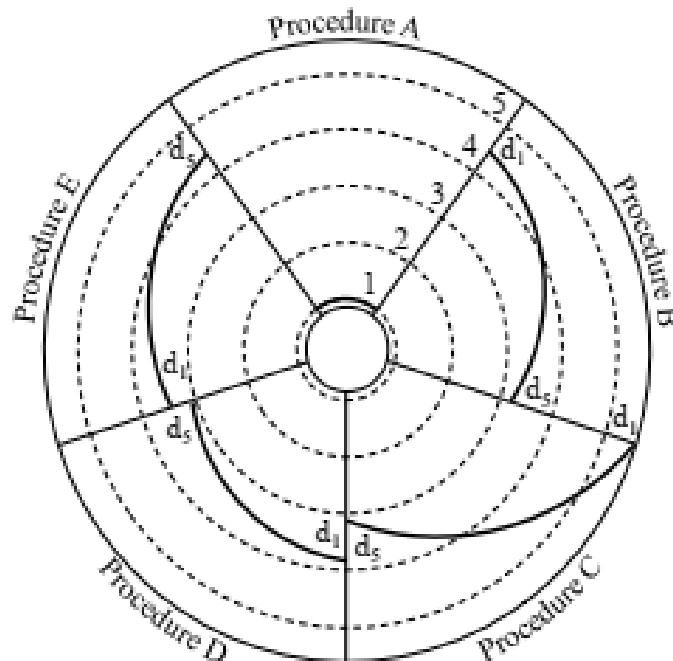
A keménysztergálás elemzése alapján mindkét eljárás (különálló művelet vagy a kombinált eljárás részeként) esetén megállapítható, hogy az anyag eltávolítása hatékonyabb, ha wiper lapkát alkalmazunk. Az anyagleválasztási sebesség elemzésben a vizsgált átmérőtartományon a legkisebb átmérőnél (C eljárás) 13,0 mm³, míg a legnagyobb átmérőnél (E eljárás) 22,0 mm³ volt az egy másodperc alatt egy műveletben eltávolított anyagmennyiség maximuma (7. ábra).



7. ábra: A műveleti idő alapú anyagleválasztási sebesség gyakorlati értékei különböző furat átmérők mellett

Az anyagleválasztási sebességek arányait a köszörüléséhez viszonyítva a 8. ábra mutatja. A furat átmérőjének növekedésével a többi eljárás elsőbbsége a köszörüléssel szemben csökken, de továbbra is jelentős marad. Más szempontból: a furatátmérő csökkenésével minden eljárás anyagleválasztási sebessége jelentősen nő a köszörüléséhez képest (B/A: 4,46...2,26, C/A: 5,56...3,10; D/A: 3,82...3,04, E/A: 4,04...3,46). A legkisebb átmérőnél a legkisebb növekmény az anyagleválasztási

sebességek arányában 3,82 (D/A), míg a legnagyobb növekmény 5,56 (C/A). A legnagyobb átmérőnél a legkisebb növekmény 2,26 (B/A), míg a legnagyobb növekmény 3,46 (E/A).



8. ábra: A műveleti idő alapú anyagleválasztási sebesség aránya a hosszeltolósos köszörülést bázisnak tekintve különböző furat átmérők mellett

Ezen eredmények alapján megállapítható, hogy az anyagleválasztás hatékonyságát befolyásolja a furat geometriája. A hatás mértéke a különböző keménymegmunkáló eljárásoknál eltérő. Az elemzett furathossz- és furatátmérő tartományokban az anyagleválasztási sebesség alapján a keményesztergálás és a kombinált eljárás azok az eljárások, amelyek a köszörüléshez képest lényegesen nagyobb hatékonysággal rendelkeznek. A furathossz növekedésének hatása a kombinált eljárásoknál az anyagleválasztási sebességre a köszörülés értékeihez képest jelentősnek ítéltető, míg a többi eljárásnál gyakorlatilag változatlan. A furat átmérőjének csökkentése minden eljárásnál az anyagleválasztási sebesség jelentős növekedéséhez vezet a köszörüléshez képest. Akár különálló műveletként, akár a kombinált eljárás részeként vizsgáljuk a keményesztergálást, az eredmények azt mutatják, hogy a wiper kialakítású lapka alkalmazása hatékonyabb anyageltávolítást eredményez.

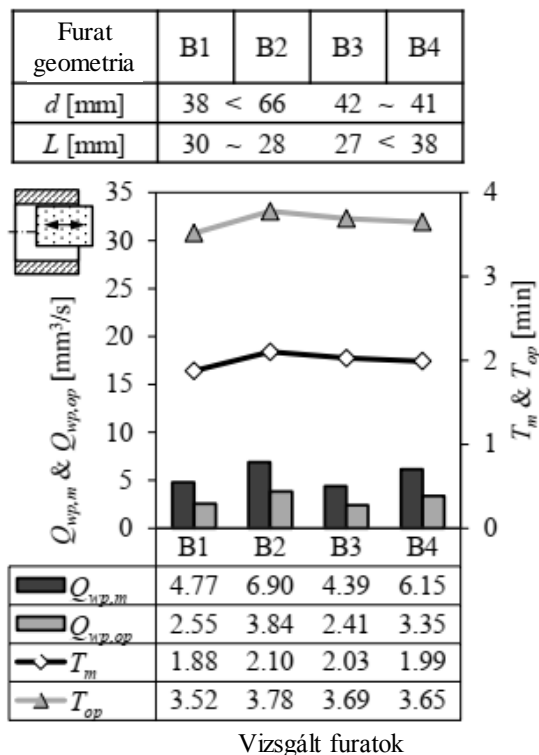
2.2 Eljárásválasztás adott furatgeometriai paraméterek esetén

Az előző részben ismertetett technológiai adatok és eljárásváltozatok (A-E) mellett vizsgáltuk a hatékonysági paramétereket abból a célból, hogy sorrendet állítsunk fel az eljárásváltozatok között, miközben a furat geometriai paraméterei eltérőek. Ebben a vizsgálatban a furathossz és furatátmérő valós gyártott alkatrész adatai voltak. Négy különböző furatot vizsgáltunk a 3. táblázatban összefoglalt geometriai értékekkel.

3. táblázat: Geometriai adatok

Furat jele	B1	B2	B3	B4
Furatátmérő (d) [mm]	38	66	42	41
Furathossz (L) [mm]	30	28	27	38

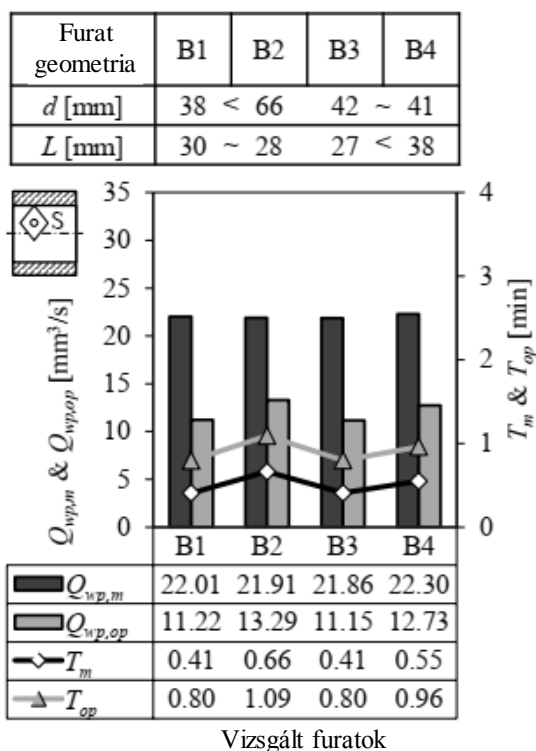
A hosszolótolásos köszörülést vizsgálva a műveleti idő alapján számított $Q_{wp,op}$ értékek 2,41 és 3,84 mm³/s között változnak. Ez az eljárás általánosnak tekinthető az edzett fogaskerék furatok megmunkálására, ezért ezt az eljárást tekintettük bázis eljárásnak (9. ábra).



9. ábra: Idő és hatékonysági paraméterek hosszolótolásos köszörülésnél

A következő elemzett eljárásban a határozott élű szerszám alkalmazását vizsgáltuk. A keménysztergálás elemzésbe történő bevonásának oka nemcsak az elérhető pontosság és felületi érdesség, hanem az is, hogy a megmunkálás szárazon végezhető, szemben a nagy mennyiségű hűtő- és kenőanyagot igénylő köszörüléssel. Ezért a keménysztergálással jelentősen csökkenthető a környezetterhelés mértéke [12]. A keménysztergálással két fogásban (nagyolás és simítás) érhetőek el az érdességi és pontossági előírások. Mindkét fogásban sztenderd lapka alkalmazását vizsgáltuk.

A műveleti idő alapján a $Q_{wp,op}$ értékek 11,15 és 13,29 mm³/s között változnak. A műveleti idő alapján számított anyagleválasztási sebesség a hosszolótolásos köszörüléséhez képest 4,07-szeres. Így megállapítható, hogy az anyageltávolítás intenzívebb és ezért hatékonyabb, mint a köszörülés esetén (10. ábra).



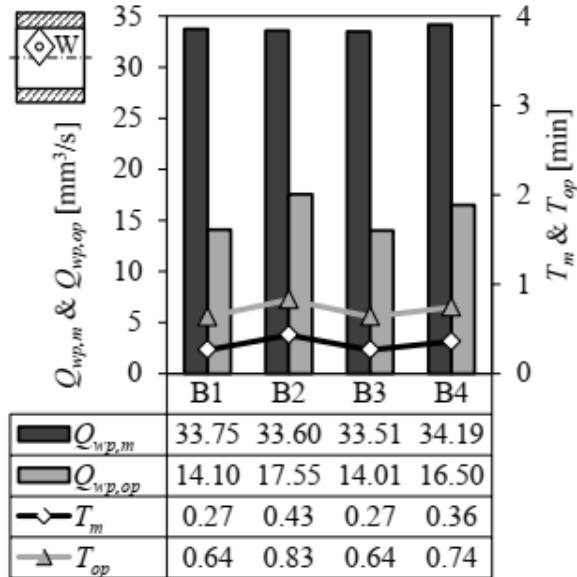
10. ábra: Idő és hatékonysági paraméterek sztenderd lapkával történő keménysztergálásnál

A következő eljárás során két különböző lapka alkalmazását vizsgáltuk. A nagyobb előtoló sebességet lehetővé tettük a wiper lapka alkalmazását vizsgáltuk, ezért nagyobb előtoló sebességet lehetett alkalmazni. A műveleti idő alapján számított $Q_{wp,op}$ paraméter értékei 14,10 és 17,55 mm^3/s között változtak. A műveleti idő alapján számított és a hosszeltolással összehasonlított anyagleválasztási sebesség 5,21-szeres (11. ábra).

Mivel az alkalmazott eljárásokat befejező eljárásoknak tekinthetjük, nemcsak az érdességi és pontossági értékeket vesszük figyelembe, hanem a megmunkált felület működési követelményeinek teljesülését is. A fogaskerék furatok esetén ez azt jelenti, hogy a keménysztergálással kialakított topográfia a periodikus jelleg miatt nem mindig megfelelő. Ebben az esetben az utolsó lépésnek egy abrazív eljárásnak kell lennie a random topográfia biztosítása érdekében.

A műveleti idővel számított $Q_{wp,op}$ paraméter értékei 8,69 és 11,03 mm^3/s között változtak. A hosszeltolással képest a műveleti idő értékei 28-35% között változnak. A műveleti idővel számított anyagleválasztási sebesség 3,28-szoros (12. ábra).

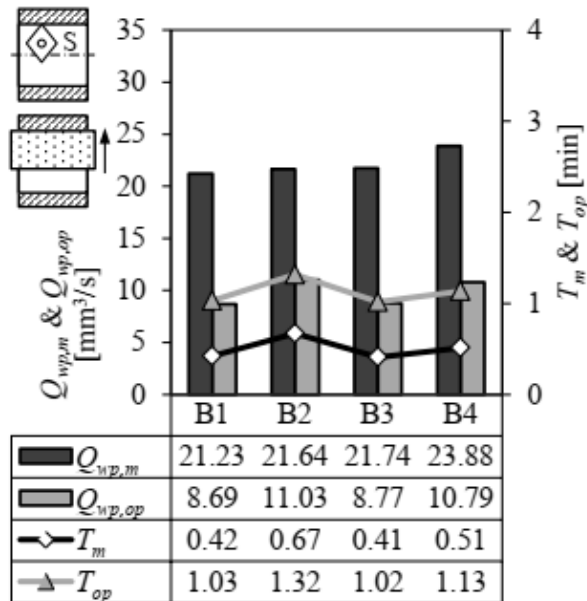
Furat geometria	B1	B2	B3	B4
d [mm]	38 < 66		42 ~ 41	
L [mm]	30 ~ 28		27 < 38	



Vizsgált furatok

11. ábra: Idő és hatékonysági paraméterek wiper lapkával történő keménysztergálásnál

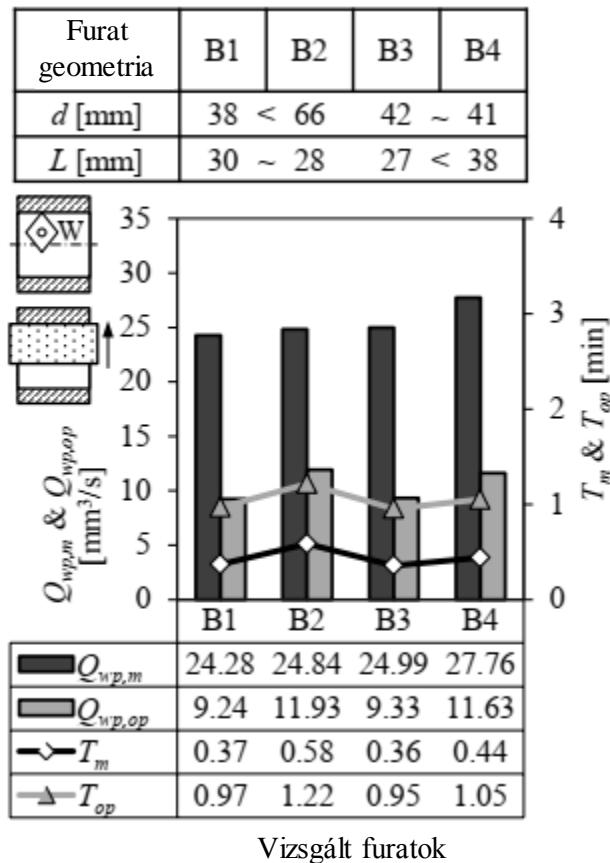
Furat geometria	B1	B2	B3	B4
d [mm]	38 < 66		42 ~ 41	
L [mm]	30 ~ 28		27 < 38	



Vizsgált furatok

12. ábra: Idő és hatékonysági paraméterek kombinált eljárásnál (keménysztergálás sztenderd lapkával)

A következő elemzett változatban a kombinált eljárásban a lapka wiper típusú. A műveleti idő alapján számított $Q_{wp,op}$ paraméter értékei 9,24 és 11,93 mm³/s között változtak. A műveleti idő alapján számított és a hosszeltolósos köszörüléssel összehasonlított anyagleválasztási sebesség 3,52-szeres (13. ábra).



13. ábra: Idő és hatékonysági paraméterek kombinált eljárásnál (keménysztergálás wiper lapkával)

Az az anyagleválasztási sebességek alapján az eljárások rangsora meghatározható:

$$A \rightarrow D \rightarrow B \rightarrow E \rightarrow C$$

A geometriai paraméterek gyakorlati anyagleválasztási sebességre gyakorolt hatásának elemzése során megállapítást nyert, hogy az eljárások ajánlott sorrendje a legtöbb geometriai értéknél azonos. A viszonylag hosszú furatok esetében (B4 furat) a sztenderd lapkával végzett keménysztergálás kevésbé bizonyult hatékonynak, mint a sztenderd betétekkel végzett kombinált eljárás.

2.3 A marás forgácsolási adatainak hatása az anyagleválasztási sebességre

Forgácsolási kísérleteink során két különböző átmérőjű marófejet alkalmaztunk, és hasonlítottuk össze az átmérő hatását az anyagleválasztási sebességre. Az egyik szerszám az MB-X3-063-08-Z12/P típusú forrasztott gyémántlapkás homlokmaró ($d_s=63$ mm; $z_s=12$; $\kappa_r=90^\circ$), a másik szerszám pedig az AA02.353.596 típusú forrasztott gyémántlapkás homlokmaró ($d_s=80$ mm; $z_s=16$; $\kappa_r=90^\circ$). A szekrényes munkadarab

anyaga AlSi9Cu3(Fe)(Zn), a megmunkált felület átlagos szélessége $b=34$ mm. A megmunkált felület teljes hossza: 1583 mm. A forgácsolósebesség (v_c) a kísérletekben 2474 és 3016 m/min között, a főorsó fordulatszáma (n_s) 10000 és 13500 1/min között, a szerszám egy élre jutó előtolása (f_z) 0,12 és 0,15 mm/él között, az előtoló sebesség (f) pedig 18000 és 24960 mm/min között változott. Az átlagos fogásmélység $a_p=1,5$ mm volt. A marószerszám átmérője (d_s) a teljes megmunkált felület esetén meghaladja a változó szélességű felületet, ezért a szerszám által egyszer megtett hosszon egy fogásban kerül leválasztásra a ráhagyás. Így a leválasztott teljes térfogat és az alapján az anyagleválasztási sebesség gyakorlati értéke:

$$V = a_p b L, \quad (2)$$

$$Q_{w,p} = \frac{V}{t_a}, \quad (3)$$

ahol b a megmunkált felület átlagos szélessége, L a szerszám által megtett hossz, t_a pedig a vizsgált időparaméter, a megmunkálás alapideje.

Az anyagleválasztási sebesség gyakorlati értékeinek számított értékeit a 4. táblázat foglalja össze. A 14. ábra ezeknek az értékeknek a százalékban kifejezett növekedését mutatja be a „D1-1” beállítást bázisnak tekintve.

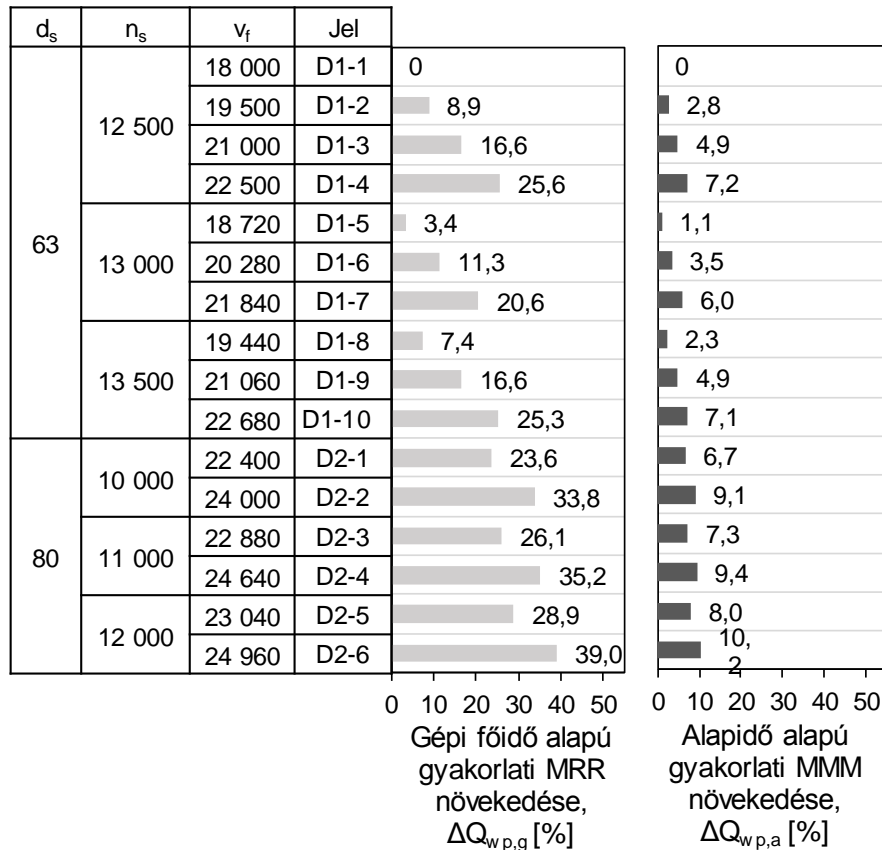
4. táblázat Az anyagleválasztási sebesség gyakorlati értékei a gépi főidővel ($Q_{wp,g}$) és az alapidővel ($Q_{wp,a}$) számolva [mm^3/s]

Beállítás	$Q_{wp,g}$	$Q_{wp,a}$	Beállítás	$Q_{wp,g}$	$Q_{wp,a}$
D1-1	12 656	4 173	D1-9	14 761	4 379
D1-2	13 779	4 288	D1-10	15 863	4 471
D13	14 761	4 379	D2-1	15 648	4 454
D1-4	15 895	4 473	D2-2	16 928	4 552
D15	13 087	4 219	D2-3	15 958	4 478
D1-6	14 092	4 318	D2-4	17 107	4 564
D1-7	15 264	4 422	D2-5	16 312	4 506
D1-8	13 593	4 270	D2-6	17 592	4 598

Hasonlóan a megmunkálást jellemző idők csökkenéséhez a gyakorlati anyagleválasztási sebességek is növekedést mutatnak az előtoló sebesség, a főorsó fordulatszám és a marófej átmérője növelése következtében.

A $d_s=63$ mm átmérőjű marófej alkalmazásakor az előtoló sebesség 18000-ról 22680 mm/min-re történő növelésekor az alapidő alapján számított anyagleválasztási sebesség 7,1%-kal nő. A $d_s=80$ mm átmérőjű marófej alkalmazásakor az előtoló sebesség 22400-ról 24960 mm/min-re történő növelésekor az alapidő alapján számított gyakorlati anyagleválasztási sebesség 3,2%-ka nő. A legnagyobb n_s és v_f értékek esetén a marófej átmérő 63-ról 80 mm-re történő növelésével az alapidő alapján számított gyakorlati

anyagleválasztási sebesség 2,84%-kal nő. Adott marófej átmérő és főorsó fordulatszám esetén, az előtoló sebességnek a vizsgálati tartományban a legkisebbről a legnagyobb értékre való növelésekor a következő összefüggéseket kaptuk. A 63 mm átmérőjű marófej esetén az alapidő alapján számított gyakorlati anyagleválasztási sebesség értékek 4,7-7,19%-kal, a 80 mm átmérőjű marófej pedig 1,9-2,2%-kal nőnek.



14. ábra: Az anyagleválasztási sebesség gyakorlati értékének növekedése

Az adatok alapján megállapítható, hogy legkisebb mértékben a főorsó fordulatszám (n_s) növelésével nő az anyagleválasztási sebesség gyakorlati értéke, a fogankénti előtolás (f_z) növelésével viszonylag kis mértékben nő, illetve a marófej forgácsolóélei számának (z_s) növelésével jelentős mértékben nő az eredeti technológiai beállításhoz ($d_s=63$ mm; $n_s=12500$ 1/min; $v_f=18000$ mm/min) viszonyítva.

2.4 Saját munka és tézisek

2.4.1 Saját munka

A megmunkálási hatékonyság témakörben a Gyártástudományi Intézet több munkatársa részt vett. Saját munkám az alkatrészek geometriai jellemzői gyakorlati anyagleválasztási sebességre gyakorolt hatásának a vizsgálata és elemzése esztergálás és köszörülés esetén.

A marási kísérletek elvégzése nem saját munkám, a marás technológiai paramétereinek anyagleválasztási sebességre gyakorolt hatásának az elemzése és a kapott eredmények saját munkám.

2.4.2 *A saját munka alapján megfogalmazott tézisek*

1. tézis: Vizsgáltam a belső hengeres felületek geometriai paramétereinek változásának a hatását az anyagleválasztási sebesség gyakorlati értékére. Betétben edzhető általánosan használt anyagminőségre igazoltam, hogy keménysztergálásnál a gyakorlati anyagleválasztási sebesség értékei 2 – 4-szer, a keménysztergálással kombinált beszúró köszörülés eljárásváltozatánál pedig 1,2 – 2,4-szer nagyobbak a hosszeltolósos köszörüléshez képest üzemi körülmények között alkalmazott forgácsolási adatok mellett. [S1, S2]
2. tézis: A furatátmérő és furathossz anyagleválasztási sebesség alapján történő részletes vizsgálata alapján, és emellett a keménysztergálást, illetve a kombinált eljárást a hagyományos hosszeltolósos köszörüléshez viszonyítva, illetve sztenderd és wiper típusú lapka alkalmazását összehasonlítva számszerűen igazoltam, hogy a wiper kialakítású lapka alkalmazása hatékonyabb anyageltávolítást eredményez. [S3]
3. tézis: A sorozatgyártás műveleti ideje alapján számított anyagleválasztási sebesség gyakorlati értéke alapján megmunkálási hatékonyság-alapú sorrendet állítottam fel a hosszeltolósos köszörülés, a keménysztergálás és a kombinált eljárások között üzemi körülmények között gyártott furatgeometriák figyelembevételével. [S4]
4. tézis: Marási kísérletek eredményeképp vizsgáltam az anyagleválasztási sebesség megmunkálási alapidő alapú paraméterének alakulását különböző forgácsolási paraméterek és alkalmazott szerszámok mellett. Számszerűen igazoltam, hogy legkisebb mértékben a főorsó fordulatszám növelésével nő az anyagleválasztási sebesség gyakorlati értéke, a fogankénti előtolás növelésével viszonylag kis mértékben nő, a marófej forgácsolóelei számának növelésével jelentős mértékben nő a paraméter értéke. [S5, S6]

3 A 3D–S FELÜLETI TOPOGRÁFIA MÉRÉS MÓDSZERTANI VIZSGÁLATA

A kutatási témán belül a viszonylag újnak számító 3D–s felületi topográfia és textúra elemzéshez kerültek kidolgozásra mérési, illetve értékelési módszerek.

Kutatási előzmények: a Gyártástudományi Intézet kutatási témáin belül jelentős szerepet játszik a keménysztergálással, köszörüléssel, marással, vasalással, vízsugaras vágással stb. megmunkált felületek érdekessége és az alkatrészek pontossága. A kutatások korábban elsősorban a 2D–s felületi érdekességi paraméterek elemzésére, különböző eljárásokkal megmunkált felületek 2D és 3D érdekességi paraméterek alapján történő összehasonlító elemzésére, a felületi érdekesség és az alkatrész pontossági paraméterek kapcsolatának a vizsgálatára, a bonyolult textúrájú felületek (pl. mart felület) vizsgálati sajátosságaira irányultak. A vizsgálatok egy részét autóiipari gyártó partnervállalat fejlesztési igényei motiválták.

A kutatás célja annak meghatározása, hogy a topográfia és textúra paraméterek esetén mekkora a minimális mérési, illetve kiértékelési terület. A 3D–s mérés és elemzés esetén a felület szkennelése viszonylag sok időt vesz igénybe (nagy pontosságú mérés esetén akár 5 órát is), ami az ipari gyakorlatban viszonylag magas munkaidő, illetve költség terhet jelent. Nagy pontosságú 3D–s mérésre azonban sok esetben szükség van (elsősorban gyártmányfejlesztés, elsőmintázás), ezért a mérési tartomány minimalizálásán keresztül történő mérési idő minimalizálás lényeges fejlesztési cél.

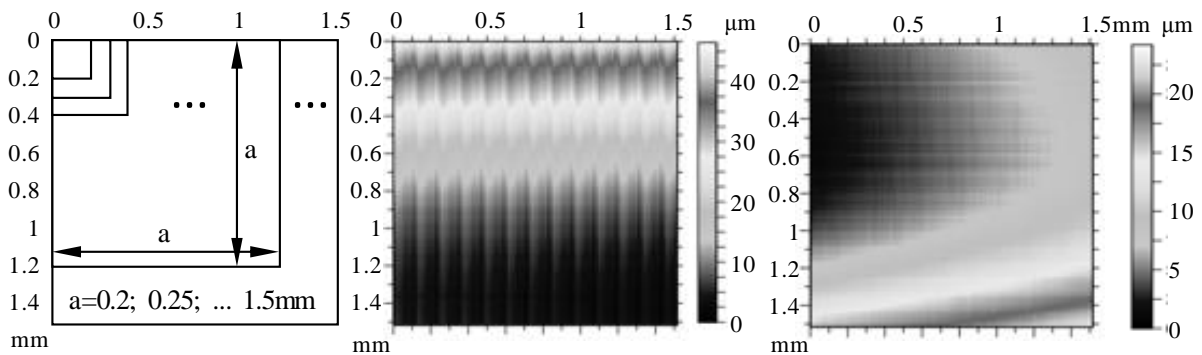
A kutatások során 16MnCr5 és 20MnCr5 betétben edzhető acélok felületi jellemzőit vizsgáltam keménysztergálás és köszörülés után. A vizsgált felületek külső hengeres felületek, illetve fogaskerekek belső hengeres felületei. A darabok keménysége 61–64 HRC közötti volt.

3.1 Minimális kiértékelési terület meghatározása az érdekességi paraméterek szórása alapján referencia határértékek segítségével

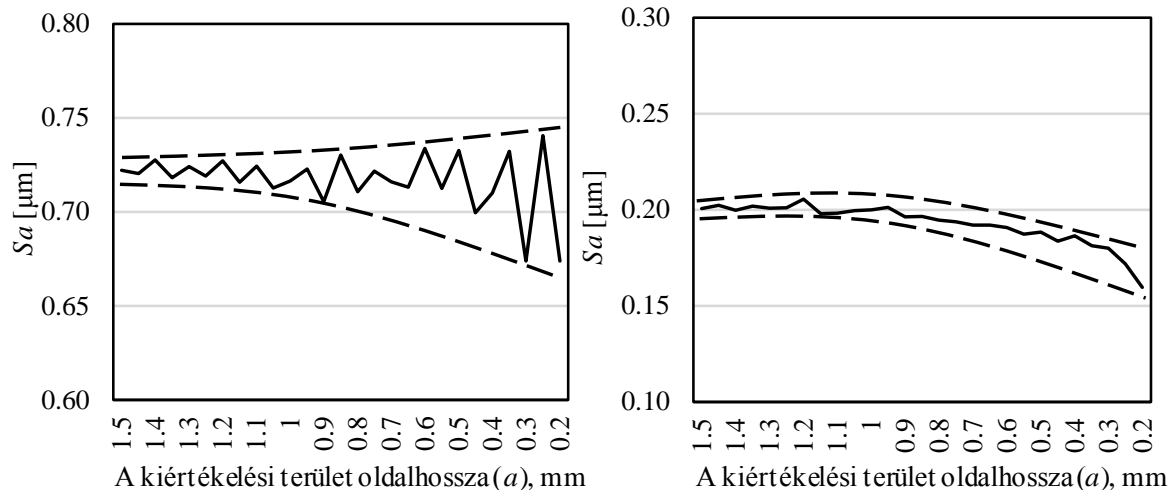
Az utóbbi évtizedekben számos tanulmány született a felületi érdekesség, illetve textúra vizsgálatára 3D–s paraméterek vizsgálata alapján. Problémát jelent, hogy nincs egységes szabvány a mérési felület nagyságára vonatkozóan. Keménysztergálás esetén például $0,5 \times 0,5$ mm, vagy akár $2,5 \times 2,5$ mm nagyságú területet is vizsgáltak [13, 14]; köszörülés esetén ugyanilyen viszonylag nagymértékű különbséget tapasztalunk [13, 15]. Az sem ritka, amikor eltérő oldalhosszúságú a letapogatott felület [16, 17].

Fogaskerek furatának keménysztergálással és köszörüléssel történő megmunkálása után az átlagos érdekesség értékre (S_a) és a ferdeségi mérőszámra (S_{sk}) határoztam meg egyenlő oldalhosszúságú minimális mérési területet. A furat megmunkált átmérője 38 mm, a furat hossza 29,85 mm volt és 0,15 mm ráhagyás eltávolítása történt mindkét technológia alkalmazásával. Az alkalmazott szerszámgépek: EMAG VSC 400 DS kombinált megmunkálóközpont és SI–4/A egyetemes köszörűgép. A

keményesztergáláshoz alkalmazott szerszám CBN lapka, a köszörüléshez korund korong. Mindkét eljárásban nagyolás és simítás történt, a simító művelet technológiai adatai keményesztergálásnál: $v_c = 180$ n/min; $f = 0,12$ mm/ford; $a_p = 0,05$ mm, köszörülésnél pedig $v_c = 30$ m/s; $v_w = 18$ m/s; $v_{FL} = 2$ m/min. A megmunkált anyag 16Mcr5 (HRC 62 volt. A topográfia mérését és elemzését az AltiSurf 520 típusú mérőgépen végeztem. A paramétereket az ISO 25178-2:2012 szabvány definiálja. A mérés során a felület pontjainak letapogatása X és Y irányban $1 \mu\text{m}$ -enként történt. A letapogatott terület nagysága $2,3 \times 2,3$ mm volt, figyelembevéve a cut-off $\lambda_c = 0,8$ mm értékét, a kiértékelési terület $1,5 \times 1,5$ mm volt. Az elemzés során egyre kisebb területeken határoztam meg a vizsgált paraméterek értékeit, a csökkentés léptéke $0,5$ mm volt (15 ábra). A vizsgált tartományok mérete $0,2 \times 0,2$ mm és $1,5 \times 1,5$ mm közötti volt.



15. ábra: Kiértékelési tartomány meghatározása

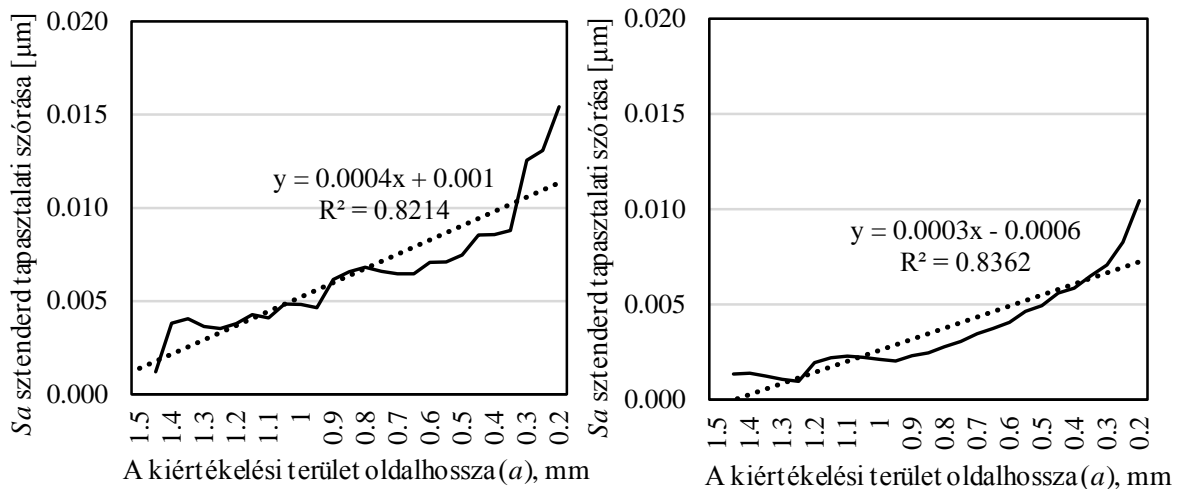


16. ábra: Az S_a értékei a kiértékelési terület függvényében (a) keményesztergálásnál és (b) köszörülésnél

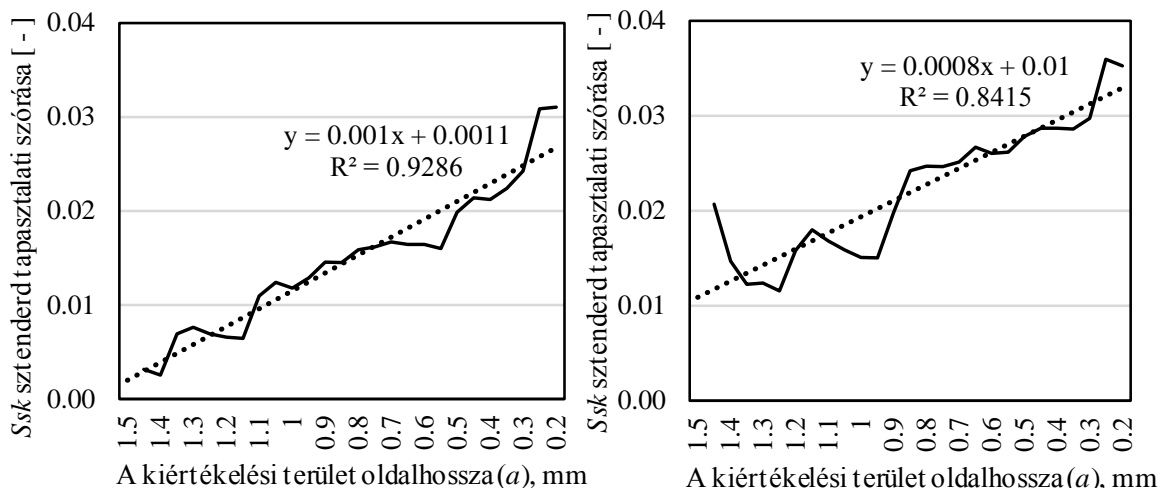
A 16. ábrán a kiértékelési terület függvényében láthatók a mért S_a értékek. Keményesztergálás esetén (16. ábra, a) az értékek periodikus ingadozást mutatnak, köszörülés esetén (16. ábra, b) jelen van az ingadozás kisebb mértékben, de a negatív irányú tendencia a meghatározó. Vizsgáltam az öt legnagyobb kiértékelési területen

kapott értékeket mind az Sa , mind az Ssk paraméterre, mert látszólag ebben a tartományban még viszonylag kicsi eltérések mutatkoznak. Az Sa paraméter esetén a standard tapasztalati szórás ezen a tartományon $0,0036 \mu\text{m}$ és $0,0011 \mu\text{m}$ rendre keménysztergálás és köszörülés esetén. Az Ssk paraméter esetén ezek az értékek rendre $0,0076 \mu\text{m}$ és $0,0124 \mu\text{m}$.

Vizsgáltam a sztenderd tapasztalati szórás változását a kiértékelési terület csökkentésének hatására. A csökkenő terület torzulást eredményez az érdességi paraméterek értékeiben, ennek következtében az adatok szórása megnövekszik. Minél több eltérő (egyre kisebb) terület kerül figyelembevételre a szórás számításánál, annál inkább növekvő tendenciát mutat a szórás érték (17-18. ábra).



17. ábra: Az Sa sztenderd tapasztalati szórásának változása a kiértékelési terület függvényében (a) keménysztergálásnál és (b) köszörülésnél



18. ábra: Az Ssk sztenderd tapasztalati szórásának változása a kiértékelési terület függvényében (a) keménysztergálásnál és (b) köszörülésnél

Ha ezen sztenderd tapasztalati szórás értékekben egy megengedett százalékos eltérést jelölünk ki, megadható a minimálisan szükséges kiértékelési tartomány. Ezt az a

területérték jelöli ki, amely értéke még nem lépi túl a kijelölt szórás határértéket. A határérték a konstruktor által kerülhet kijelölése, figyelembevéve az adott felület funkcionális sajátosságait.

Az S_a átlagos érdességi paraméterre vonatkozóan keményesztergálásnál és köszörülésnél, az S_{sk} ferdeségi mérőszámra keményesztergálás esetén 0,5%-os határérték, illetve köszörülés esetén 2%-os határérték mellett az 5. táblázatban láthatók a minimálisan szükséges kiértékelési területek.

5. táblázat: Minimális kiértékelési területek

		S_a	S_{sk}
Keményesztergálás	Sztenderd tapasztalati szórás határérték	0,005	0,005
	Szóráson belüli területek	$1,5 \times 1,5 - 0,95 \times 0,95$	$1,5 \times 1,5 - 1,4 \times 1,4$
	Minimális mérési terület	$0,95 \times 0,95$	$1,4 \times 1,4$
Köszörülés	Sztenderd tapasztalati szórás határérték	0,005	0,02
	Szóráson belüli területek	$1,5 \times 1,5 - 0,5 \times 0,5$	$1,5 \times 1,5 - 0,9 \times 0,9$
	Minimális mérési terület	$0,5 \times 0,5$	$0,9 \times 0,9$

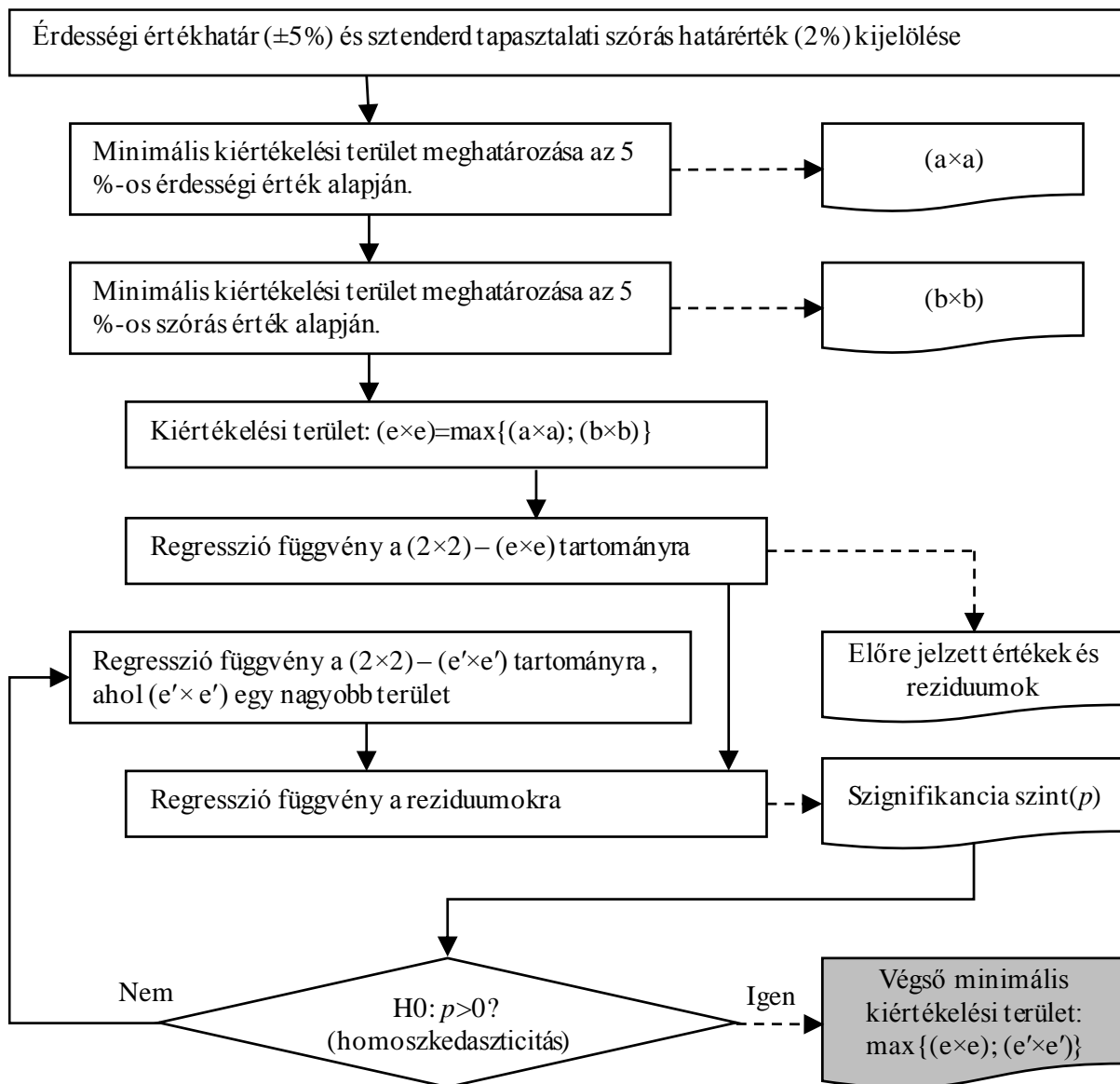
3.2 Minimális kiértékelési terület meghatározása regresszióelemzéssel

A minimalizálási módszer regresszióanalízis segítségével pontosítható. Ehhez további megmunkálási kísérletek szolgáltatottak adatot.

A fogaskerék munkadarabok furatainak névleges hossza $L = 34$ mm, átmérője $d = 38$ mm volt. A kísérletek során a furatok a teljes furathosszon (L) kerültek megmunkálásra. Két munkadarab megmunkálása keményesztergálással, egy pedig hosszfelőtolásos köszörüléssel történt. Szerszámgyártó mindkét eljáráshoz: EMAG VSC 400. A kísérletekben alkalmazott szerszámok: lapka – CCGW 09T308 NC2, szerszámszár: E25T-SCLCR 09-R, köszörűkorong: Norton 3AS80J8VET 01_36X37X13. A két keményesztergálási eljárásváltozat: M1 és M2 különböző előtolással, az M3 eljárás pedig a köszörülés. A forgácsolási paraméterek a szerszámgyártó által ajánlott határértékeken belül voltak. A keményesztergálási változatok technológiai adatai: $f = 0,1$ mm/ford. (M1); $f = 0,3$ mm/ford. (M2); $a_p = 0,2$ mm; $n = 615$ 1/min. A köszörülés technológiai adatai: $f = 0,01$ mm/ford; $L' = 36$ mm (korongszélesség); $\Delta = 0,2$ mm (sugárirányú ráhagyás); $n_w = 325$ 1/perc; $n_t = 20\ 000$ 1/min.

A felületi érdesség mérése kibővítésre került: nagyobb tartomány mérése, több paraméter vizsgálata (S_a – átlagos érdesség, S_q – egyenetlenség mértani átlaga, S_{sk} – ferdeség, S_{ku} – lapultság, S_p – maximális csúcsmagasság, S_v – maximális völgymélység). A mért terület $2,8 \times 2,8$ mm, a kiértékelési terület pedig 2×2 mm volt (a cut-off 0,8 mm, Gauss-szűrés). A beolvasott pontok száma mérésenként 1 millió volt. A különböző kiértékelési terület méreteket a mérőgép adatfeldolgozó szoftverével

(Altimap Premium) jelöltem ki. A minimalizálási módszer folyamatát az 19. ábra szemlélteti.



19. ábra: A minimalizálási módszer folyamata

A kiértékelési terület minimalizálásához először az elemzett érdességi értékek és azok szórásainak változását vizsgáljuk a kiértékelési terület csökkentése során. Ez a lépés azt a megfigyelést eredményezi, hogy az érdességi adatokban bizonyos mértékig torzulás következik be. A második lépésben minden egyes érdességi paraméterhez meghatározzuk a legkisebb kiértékelési területeket a korábban ismertetett sztenderd tapasztalati szórás alapú módszerrel. A harmadik lépésben regressziós elemzéseket végzünk a meghatározott minimális területek validálására az érdességi adatok véletlenszerűségéből eredő eltérés alapján.

Az érdességi értékek legnagyobb területen mért értékhez képesti abszolút eltérései alapján (5% eltérés megengedett) és a szórás alapján (2%) a kijelölt minimális területeket rendre a 6. és 7. táblázat foglalja össze.

6. táblázat: Érdességi értékek %-os eltérése a 2×2 mm felületen mérthez képest

	Sa [μm]			Sq [μm]			Ssk [-]		
	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
Kiértékelési terület oldalhossz	0,2	0,8	1,3	0,2	0,5	1,4	1,6	2,0	2,0
Érdesség eltérés [%]	2	2	3,4	2,1	2	1,8	4,6	0	0
	Sku [-]			Sp [μm]			Sv [μm]		
	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
Kiértékelési terület oldalhossz	0,2	2,0	2,0	1,7	0,6	1,7	0,4	1,7	1,7
Érdesség eltérés [%]	0,6	0	0	0,9	4,1	0,6	4,1	0,5	0,9

7. táblázat: Kijelölt minimális értékelési területek a 2%-os szóráshatár alapján

	Sa (μm)			Sq (μm)			Ssk (-)		
	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
Érdesség a 2 × 2 mm területen	0,398	1,127	0,621	0,471	1,378	0,784	0,153	0,666	0,468
Az érdesség 2%-a	0,008	0,023	0,012	0,009	0,028	0,016	0,003	0,013	0,009
Utolsó st.dev. érték a 2%-os határ alatt	0,003	0,019	0,010	0,000	0,000	0,009	0,002	–	–
Minimális terület oldalhossza (mm)	0,2	0,8	1	0,2	0,5	1,4	1,7	–	–
	Sku (-)			Sp (μm)			Sv (μm)		
	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
Érdesség a 2 × 2 mm területen	2,180	2,713	3,279	1,582	3,936	5,862	1,387	3,465	3,598
Az érdesség 2%-a	0,044	0,054	0,066	0,032	0,079	0,117	0,028	0,069	0,072
Utolsó st.dev. érték a 2%-os határ alatt	0,020	–	–	0,006	0,058	0,024	0,023	0,021	0,027
Minimális terület (mm × mm)	0,2	–	–	1,7	0,6	1,7	0,4	1,7	1,7

A felületi érdesség és annak szórás adatai alapján kijelölt minimális értékelési területen belül a felületi érdesség bizonyos mértékű eltérést mutat. Bizonyítandó, hogy az eltérés 95%-os (általánosan alkalmazott érték) megbízhatósági szinten elég alacsony marad. A regressziós elemzést először a kijelölt határon belüli érdességi adatokra, majd a maradék értékekre alkalmaztam.

Ha a szignifikanciaszint (p) alapján homoszkedaszticitás ($p > 0,05$) adódott a reziduumokra (regressziós egyenestől való eltérés értékei), akkor az eredeti határértéket (amelyet az érdességi adatokból a legmagasabb érték vagy a szórás alapján határoztam meg) fogadtam el minimális értékelési területként. Heteroszkedaszticitás esetén további regressziós elemzéseket végeztem a legnagyobb kiértékelési terület határhoz. Erre a módosításra a következő felületi érdesség / megmunkáló eljárás párok esetében volt

szükség: Sq -M2 ($0,6 \times 0,6$ mm); Sku -M1 ($0,4 \times 0,4$ mm); Sp -M2 ($0,7 \times 0,7$ mm); Sv -M1 ($0,6 \times 0,6$ mm). Az 8. táblázatban a minimalizálás eredményei és a szignifikanciaszintek láthatók. E harmadik lépés eredményei végleges eredményeknek tekinthetők.

8. táblázat: Minimális kiértékelési terület és a megbízhatóságot jellemző szignifikancia szint a regresszióelemzéssel történő validálás eredményeképp

Érdelességi paraméter	Eljárás	Minimális terület (mm × mm)	Signifikancia szint (p)	Érdelességi paraméter	Eljárás	Minimális terület (mm × mm)	Signifikancia szint (p)
Sa (μm)	M1	$0,2 \times 0,2$	0,823	Sku (-)	M1	$0,4 \times 0,4$	0,059
	M2	$0,8 \times 0,8$	0,099		M2	2×2	-
	M3	$1,3 \times 1,3$	0,512		M3	2×2	-
Sq (μm)	M1	$0,2 \times 0,2$	0,089	Sp (μm)	M1	$1,7 \times 1,7$	0,068
	M2	$0,6 \times 0,6$	0,122		M2	$0,7 \times 0,7$	0,167
	M3	$1,4 \times 1,4$	0,122		M3	$1,7 \times 1,7$	0,401
Ssk (-)	M1	$1,7 \times 1,7$	0,909	Sv (μm)	M1	$0,6 \times 0,6$	0,576
	M2	2×2	-		M2	$1,7 \times 1,7$	0,430
	M3	2×2	-		M3	$1,7 \times 1,7$	0,401

Az Sa , Sq , Sp és Sv paraméterek esetén minimális kiértékelési területeket határozható meg és validálható. A megmunkálási eljárástól függetlenül a Sa paraméter esetében $1,3 \times 1,3$ mm-es, az Sq paraméter esetében $1,4 \times 1,4$ mm-es, az Sp és Sv paraméterek esetében pedig $1,7 \times 1,7$ mm-es értékelési terület alkalmazható. Ezek a megállapítások csak az elemzett technológiai adatokra és az $Sa = 0,4$ - $1,13$ μm vagy $Sz = 2,97$ - $9,46$ μm felületi érdesség tartományban érvényesek. Az Ssk és Sku paramétereket elemezve csak az M1 eljárásváltozat (keménysztergálás, $f = 0,1$ mm/ford.) esetén kaptam érvényes kiértékelési területeket. Az Ssk és az Sku paraméterek esetében $1,7 \times 1,7$ mm és $0,4 \times 0,4$ mm értékelési terület ajánlott. Az $f = 0,3$ mm/rev előtolással keménysztergált felület és a köszörült felület esetén 2×2 mm-es kiértékelési terület ajánlott. Ez azonban a felületi érdesség és a sztenderd tapasztalati szórás határértékeiből adódott, és a regresszióelemzés nem igazolta.

3.3 A minimális kiértékelési terület valószínűségi vizsgálata

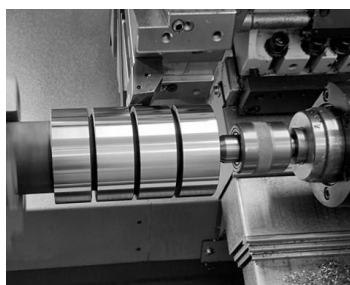
Egy vizsgálatban külső hengeres felületek megmunkálása történt keménysztergálással és beszűrő köszörüléssel. Az anyagminőség: 16MnCr5, a keménység HRC 62-64 közötti volt. A keménysztergálás és a beszűrő köszörülés esetén a technológiai adatokat két szinten vizsgáltam. Ezeket az 9. táblázat foglalja össze. A megmunkálások alapja teljes faktoriális kísérletterv volt (10 táblázat). Az alkalmazott megmunkológépek típusa a 20. ábrán látható. A mérési beállítások a korábban leírtakkal azonos volt. A kiértékelési terület oldalhossza 2,45 és 0,55 mm között változott.

9. táblázat: Technológiai adatok

Beállítás	Keménysztergálás			Köszörülés	
	f , mm/rev	a_p , mm	v_c , m/min	$v_{f,R}$, mm/s	n , 1/min
min	0,05	0,05	60	0,00688	31,5
max	0,2	0,3	150	0,03018	90

10. táblázat: Kísérletterv (0: minimum; 1: maximum forgácsolási paraméter értékek)

Technológiai adatok	Keménysztergálás								Köszörülés			
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
f	0	0	0	0	1	1	1	1				
a_p	0	0	1	1	0	0	1	1				
v_c	0	1	0	1	0	1	0	1				
$v_{f,R}$									0	0	1	1
n									0	1	0	1

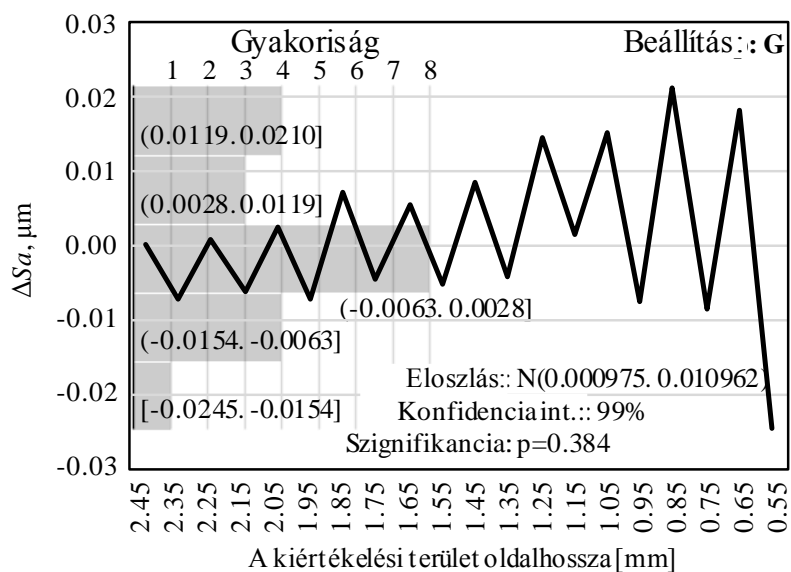


Keménysztergálás: CNC eszterga Optiturn S600
 Köszörülés: Egyetemes köszörűgép KE 250-04
 Topográfia mérés: AltiSurf 520

20. ábra: A megmunkálás és mérés gépei

A vizsgálatokat az Sa (átlagos érdesség), Sz (maximális egyenetlenség), Vmp (csúcszóna anyagtérfogat hányada) és Vvv (völgyzóna ürestérfogat hányada) paraméterekre végeztem el.

A korábban bemutatott módszer értelmében, meghatározott számú (egyre kisebb méretű) kiértékelési területen belül valamennyi területen (m darab) mért érdességi érték egy előre kijelölt tartományba esik. Eszerint a megfelelő méretű kiértékelési területek aránya az összesen belül egy relatív gyakorisági érték. Legyen a kijelölt abszolút eltérés az érdességi értékekben 5% és jelölje ezt a relatív gyakoriságot $X_{0,05}$. Vizsgáljuk az összes tartományon az értékek normalitását (21. ábra). A 95%-os konfidenciaintervallum azt jelenti, hogy ha a szignifikancia szint nagyobb, mint 0,05, akkor az eloszlás normálisnak tekinthető. A 11. táblázat a szignifikanciaszinteket foglalja össze. Megfigyelhető, hogy a referenciaértéktől való eltérés értékei nem szignifikánsak minden beállítás és topográfiai paraméter esetén.



21. ábra: Normalitásvizsgálat

11. táblázat: Szignifikanciaszintek összefoglalása

Eljárás	Beállítás	ΔSa [μm]	ΔSz [μm]	ΔV_{mp} [ml/m^2]	ΔV_{vv} [ml/m^2]
Keménysztergálás	A	0,011	0,000	0,059	0,000
	B	0,016	0,000	0,012	0,091
	C	0,110	0,000	0,266	0,564
	D	0,147	0,000	0,005	0,014
	E	0,001	0,000	0,006	0,087
	F	0,280	0,000	0,053	0,302
	G	0,3845	0,001	0,048	0,009
	H	0,057	0,001	0,163	0,373
Köszörülés	I	0,410	0,001	0,219	0,367
	J	0,460	0,001	0,019	0,013
	K	0,115	0,000	0,012	0,052
	L	0,014	0,000	0,416	0,668

Ha az eltérések eloszlása normális, a referenciaértéktől számított $\pm 5\%$ -os tartomány egy valószínűségi tartományt jelöl. Legyen az ehhez a tartományhoz tartozó valószínűségi érték $P_{0,05}$.

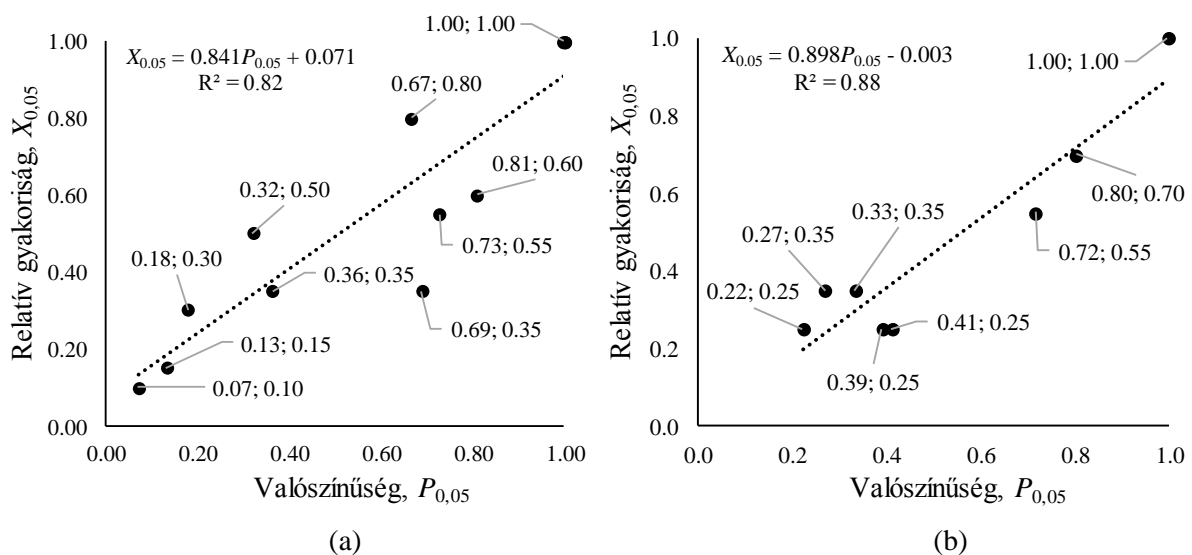
A 12. táblázat a fennmaradó beállításokat (a szignifikancia szint nagyobb, mint 0,05), a referenciaértékek 5%-át ($ref_{0,05}$), az m értékeket, a $P_{0,05}$ valószínűségeket és az $X_{0,05}$ relatív gyakorisági értékeket foglalja össze. Ha a $P_{0,05}$ és az $X_{0,05}$ értékek szoros kapcsolatban vannak egymással, akkor az m érték (a $\pm 5\%$ -os különbség módszer alapján számolással meghatározott) megbízhatónak tekinthető, azaz a relatív gyakoriság megbízható becslést ad a valószínűségekre.

Lineáris regressziós függvényt határoztam meg a $P_{0,05}$ és $X_{0,05}$ változókra (22. ábra) azokra az esetekre, ahol a szignifikancia-szint megfelelő volt. A két változó közötti

kapcsolat lineárisnak tekinthető. A determinációs együtthatók rendre 0,82 és 0,88 a keménysztergálás és a köszörülés esetén. Általánosságban ezek az értékek azt mutatják, hogy a $P_{0,05}$ és az $X_{0,05}$ változók között erős kapcsolat van, ami azt jelenti, hogy az m érték megbízhatóan jelöli ki az értékelési területet.

12. táblázat: A relatív gyakorisági és a valószínűség értékek összefoglalása

Eljárás	Parméter	Beállítás	$ref_{0,05}$	$P_{0,05}$	m	$X_{0,05}$	Eljárás	Parméter	Beállítás	$ref_{0,05}$	$P_{0,05}$	m	$X_{0,05}$
Keménysztergálás	Sa	C	0,0096	0,1310	3	0,15	KE,	Vvv	E	0,0018	0,6876	7	0,35
		D	0,0055	0,8099	12	0,6			F	0,0015	0,3616	7	0,35
		F	0,0323	0,9972	20	1		Sa	I	0,0553	0,7168	11	0,55
		G	0,0518	0,9999	20	1			J	0,0405	0,3902	5	0,25
		H	0,0537	0,9999	20	1			K	0,0376	0,8033	14	0,70
	Vmp	A	0,0004	0,1773	6	0,3	Köszörülés	Vmp	I	0,0025	0,2227	5	0,25
		C	0,0005	0,0699	2	0,1			L	0,0037	0,3336	7	0,35
		F	0,0011	0,6665	16	0,8		Vvv	I	0,0063	0,4102	5	0,25
	Vvv	B	0,0010	0,3199	10	0,5	K		0,0060	0,2704	7	0,35	
		C	0,0014	0,7280	11	0,55	L	0,0068	0,9989	20	1,00		

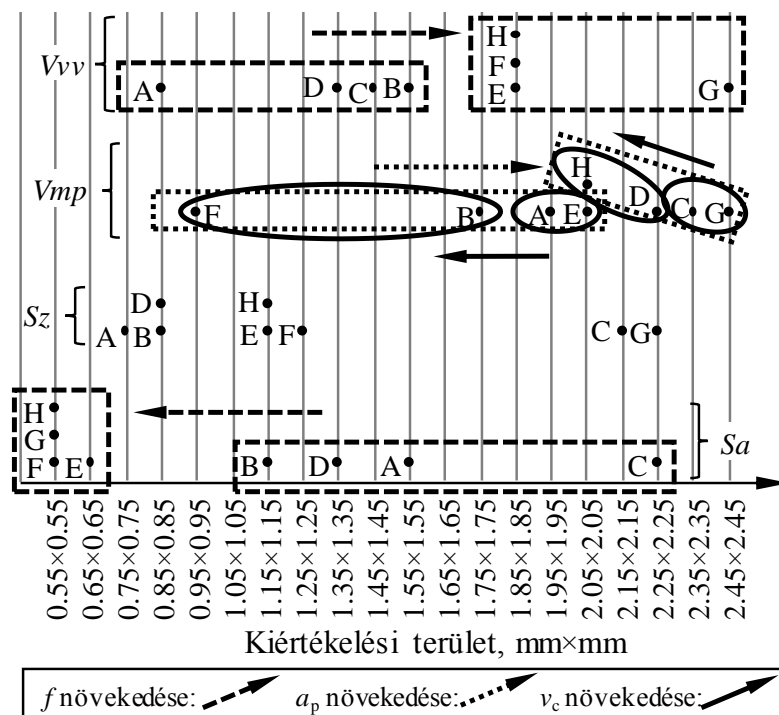


22. ábra: Korreláció az $X_{0,05}$ és $P_{0,05}$ változók között (a) keménysztergálás és (b) köszörülés esetén

Ha a kijelölt referenciaértékek és a különböző területméretekhez kapcsolódó tényleges topográfiai paraméterértékek közötti különbségek normális eloszlást mutatnak; a minimális kiértékelési területre valószínűségi alapú kijelölés (konfidenciaintervallum meghatározása és szignifikancia-szint számítása alapján) végezhető. Az elvégzett kísérletekben 95%-os konfidenciaintervallumot és 0,05-ös szignifikancia szintet

jelöltem ki és a szignifikancia szint nem érte el ezt az értéket minden paraméter / kísérleti beállítás kombinációnál. Ha egy paraméter / beállítás kombináció 0,05-nél magasabb szignifikancia szintet mutat, a valószínűségi alapú módszerrel kijelölt terület szoros kapcsolatban áll a különbség módszerrel kijelölt területtel.

A technológiai paraméterek minimális kiértékelési területre gyakorolt hatását illetően az S_a paraméter esetén megfigyelhető, hogy keménysztergálásnál nagyobb előtolásnál (beállítások E-H) az értékelési terület minimális lehet. Alacsonyabb előtolásnál a terület mérete 1,05×1,05 mm és 2,25×2,25 mm között változik. Ezen a tartományon belül nincs egyértelmű tendencia a négy beállítás esetén. Az S_z paramétert illetően nem figyelhető meg egyértelmű tendencia vagy szabály. A minimális területek 0,75×0,75 mm és 2,25×2,25 mm között változnak. Ennek oka lehet e paraméter speciális jellege (maximális érdességet jelent a teljes területen). A V_{mp} paramétert elemezve két tendencia figyelhető meg. A fogásmélység növelésével a minimális kiértékelési terület nő (C, D, G és H beállítások). Eközben a forgácsolósebesség növekedésével az csökken (B, D, F és H beállítások). A V_{vv} paramétert elemezve azt látjuk, hogy az előtolás növelésével a minimális terület mérete nő. Ezeket a keménysztergálásra vonatkozó megfigyeléseket a 23. ábra foglalja össze. Az elemzés eredményeként nemcsak egy érdességi paraméter, hanem az alkalmazott technológiai adatok alapján is információt kapunk a minimális kiértékelési területről. A köszörülés esetén ilyen egyértelmű tendenciák nem figyelhetők meg. Ha az előtolás kisebb (I. és J. beállítás), akkor az elemzett paraméterek minimális mérési felületei 1,45×1,45 mm és 2,45×2,45 mm között változnak. A K beállításban (nagy előtolás és alacsony fordulatszám) a minimális területek 1,15×1,15 mm és 1,85×1,85 mm között változnak.



23. ábra: A technológiai adatok és a minimális kiértékelési terület közötti kapcsolatok

3.4 A 2D-s és 3D-s érdességi paraméter értékek eltérései

A megmunkált edzett felületek minőségét számos tanulmány szerint a felületi érdesség elemzésével vizsgálták köszörüléskor [18, 19] és esztergáláskor [20]. Fontos kérdés, hogy a 2D-s paraméterek mért értékei mennyiben vannak összhangban a megfelelő 3D-s paraméter értékeivel.

Betétedzett acél keményesztergált és köszörült felületein a mért 2D-s és 3D-s topográfiai paramétereinek az eltéréseit vizsgáltam. A 3D-s érdességi paraméterek alkalmazásának a célja a hagyományos 2D-s paraméterekhez képes többek között annak nagyobb pontossága. Azt vizsgáltam, hogy mennyiben térnek el a 2D-s paraméter értékek a pontosabbnak tartott 3D-s értékeknél. Megjegyzendő, hogy a 2D-s mérés jelentősen kevesebb időt igényel, ezáltal kevésbé költséges, így a megbízhatóságának vizsgálata lényeges terület.

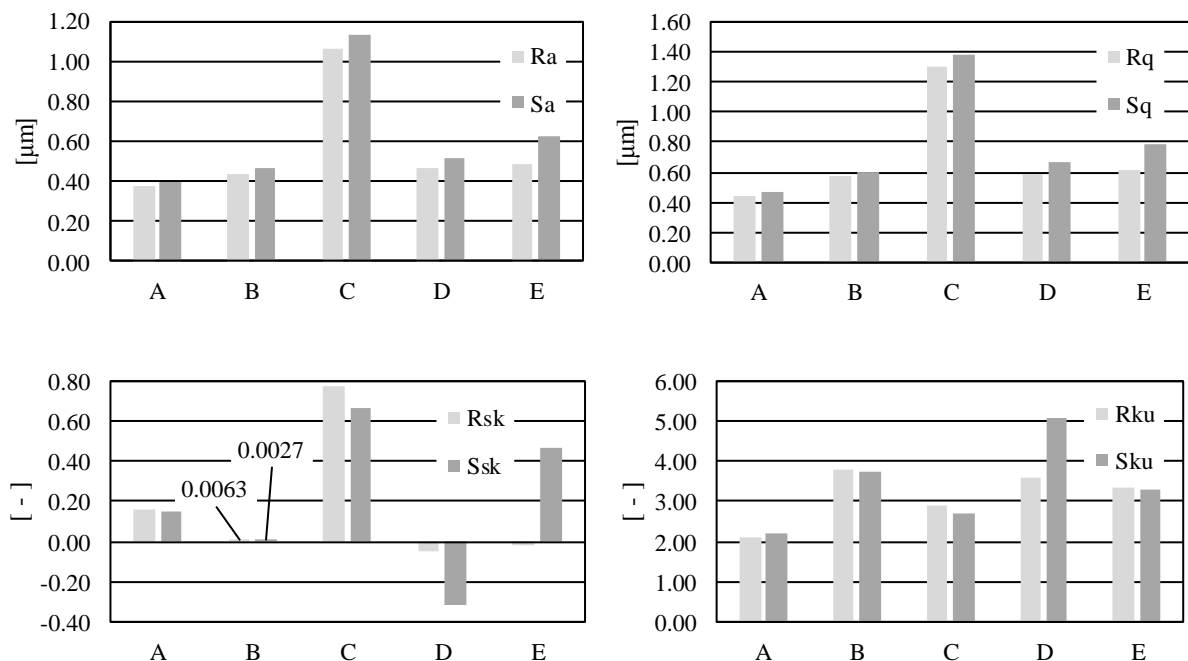
A kísérleteket egy EMAG VSC 400 DS típusú kemény esztergapadon végeztük a Gyártástudományi Intézet kutatóival közösen. A keményesztergáláshoz CCGW 09T308 NC2 típusú lapkát választottuk, amelyet az E25T-SCLCR 09-R típusú szerszámba rögzítettünk. A köszörülési műveletet a Norton 3AS80J8VET 01_36X37X13 típusú furatköszörű koronggal végeztük. A munkadarab anyaga 20MnCr5 volt, keménysége 62-64 HRC közötti volt. A technológiai paramétereket és a felületi topográfia mérés paramétereit a 13 táblázat foglalja össze. A 24. ábra a mért topográfia értékeket foglalja össze.

13. táblázat: Technológiai és mérési adatok

Technológiai adatok						Mérési paraméterek		
Eljárás-változat	A	B	C	D	E		2D	3D
Eljárás	Keményesztergálás			Köszörülés		Cut-off	0.8 mm	
Előtolás [mm/ford]	0,1	0,2	0,3	0,01	0,01	Hossz	4 mm	-
Fogásmélység [mm]	0,2			34	34	Terület	-	4 mm ²
Beszűrés mélység [mm]	-			0,2	0,05	Szenzor	Induktív	
Munkadarab ford. [1/perc]	615			325	325	Pontok sz.	4000	1 millió
Szerszám fordulat [1/perc]	-			20000	20000	Szűrő	Gauss	

Az S_a értékek 5-28%-kal magasabbak, mint a R_a értékek. Az R_a és S_a legalacsonyabb értékeit az A változatban mértem, a legmagasabbakat pedig a C változatban. Az R_q sorrendje megegyezik a R_a értékével a megmunkált felületeken, értéke az A változatban a legalacsonyabb, a C változatban pedig a legmagasabb. Az S_q érték hasonló értékeket mutat; értéke az alacsony előtolású keményesztergálás esetén a legalacsonyabb. A legkisebb értékeket (mind az R_{sk} , mind az S_{sk}) a keményesztergált felületek közül a B változatban, a köszörült felületek közül pedig a D változatban kaptam. A 0,3 mm előtolással esztergált felület mutatja a legmagasabb R_{sk} és S_{sk} értékeket. Az R_{ku} paramétert illetően a keményesztergált felületek közül a legmagasabb értéket a B

változatban, a köszörült felületek közül pedig a D változatban kaptam. Az Sku paraméter esetében ugyanezek az eredmények születtek.



24. ábra: A 2D-s és 3D-s paraméterek összehasonlítása

Keményesztergálás esetén az Sa értékek 5-6%-kal magasabbak, mint az Ra értékek, köszörülés esetén ez 12-28%. Az Sq értékek keményesztergálás esetén 6%-kal magasabbak az Rq értékeknél, köszörülésnél pedig ez az érték 14-48%. Az Ssk értékei keményesztergáláskor az Rsk értékeknél alacsonyabbak, azok 43-94%-a, köszörülésnél, valamint az Sku -t tekintve mind a két eljárásváltozatban az értékek változóak. A paraméterek nagyságát illetően az $Sa - Ra$ és az $Sq - Rq$ értékek együtt mozognak, az $Ssk - Rsk$ és $Sku - Rku$ értékek keményesztergálás esetén együtt mozognak, de köszörülésnél nem.

3.5 Saját munka és tézisek

3.5.1 Saját munka

A minimális kiértékelési terület meghatározására végzett kísérletek, elemzések és következtetések a saját munkám.

A 2.3 fejezetben bemutatott eredmény a forgácsolási adatok minimális területre gyakorolt hatásáról az ott hivatkozott publikációban feltüntetett szerzőtársam eredménye.

A 2D-s és 3D-s érdességi paraméterértékek összehasonlítása esetén az érdességmérés, elemzés és az ehhez kapcsolódó eredmények a saját munkám, a kísérletek koncepciója és megvalósítása nem saját munkám.

3.5.2 *A saját munka alapján megfogalmazott tézisek*

5. tézis: Vizsgáltam a topográfiai paraméterek különböző kiértékelési területeken mért értékeinek alakulását a minimális kiértékelési terület meghatározása és a különböző területeken mért értékek sztenderd tapasztalati szórásai és a legnagyobb mért területen felvett referencia-topográfia paraméter alapján kidolgoztam a kiértékelési terület minimalizálásának statisztikai-alapú módszerét. A módszert keménysztergálással és beszúró köszörüléssel megmunkált felületeken mért Sa és Ssk paraméterek alapján írtam le. [S7]
6. tézis: Regresszióelemzés-alapú, a homoszkedaszticitás teljesülése szerinti iteratív módszert dolgoztam ki a minimális kiértékelési terület meghatározására, mely módszer figyelembe vesz egy kijelölt és elegendően pontosnak ítélt érdességi referenciaértéktől való eltérést és az értékek sztenderd tapasztalati szórására kijelölt határértéket is. A módszert keménysztergálással és beszúró köszörüléssel megmunkált felületeken mért Sa , Sq , Ssk , Sku , Sp és Sv paraméterek alapján írtam le. [S8]
7. tézis: Elvégeztem a sztenderd tapasztalati szórás és regresszióelemzés-alapú módszerek validációját. Az ezen módszerekkel kapott megfelelő méretű kiértékelési területek arányát az összes vizsgált területen belül relatív gyakoriságnak tekintettem és számítottam a korábbi módszerekben kijelölt érdességi érték referenciatartományokba esés valószínűségét, amennyiben az adott kiértékelési területeken kapott topográfiaértékek normalitása teljesül. Megállapítottam, hogy a relatív gyakoriság nem minden kísérleti beállításban felel meg a valószínűségi értékeknek a normalitás nem teljesülése miatt. A validációs módszert keménysztergálással és beszúró köszörüléssel megmunkált felületeken mért Sa , Sz , Vmp és Vvv paraméterek alapján mutattam be. [S9]
8. tézis: Lineáris regressziós függvényt határoztam meg a validációs módszerben értelmezett valószínűségi és relatív gyakorisági változókra azokra az esetekre, ahol a normalitási feltétel teljesült és a szignifikancia-szint megfelelő volt. A két változó közötti kapcsolat lineárisnak tekinthető. A determinációs együtthatók rendre 0,82 és 0,88 a keménysztergálás és a köszörülés esetén. Általánosságban ezek az értékek azt mutatják, hogy a valószínűségi és relatív gyakorisági változók között erős kapcsolat van, ami azt jelenti, hogy a módszerrel megbízhatóan jelölhető ki a minimális kiértékelési területet. [S9]
9. tézis: Vizsgáltam a 2D-s és 3D-s topográfiai paraméterek egymáshoz való viszonyát különböző forgácsolási paraméterbeállítások mellett keménysztergálás és beszúró köszörülés esetén. Igazoltam, hogy a paraméterek nagyságát illetően az $Sa - Ra$ és az $Sq - Rq$ értékek együtt mozognak, az $Ssk - Rsk$ és $Sku - Rku$ értékek keménysztergálás esetén együtt mozognak, de köszörülésnél nem. [S10]

4 KEMÉNYMEGMUNKÁLT FELÜLETEK FUNKCIONÁLIS SAJÁTOSSÁGAI

4.1 Eljárási sorrendváltozatok a felületek funkcionális tulajdonságait jellemző topográfiai paraméterek alapján

A megmunkálási technológia fejlődésének és az egyre hatékonyabb megmunkálási eljárásoknak [21] köszönhetően a megmunkált felületek minőségét a lehető legpontosabban kell leírni. Ha a szerszám lineáris mozgást végez [22] vagy ha forgó szerszámot alkalmazunk [23] ezek a kinematikai jellemzők eltérő felületi topográfiához vezetnek [24, 25]. Különböző megmunkálási eljárásokkal (pl. keményesztergálás vagy köszörülés) azonos vagy közel azonos érdességi értékeket lehet elérni; az eltérő forgácsolási jellemzők miatt azonban a felületi topográfia is eltérő lesz [26]. A kemény anyagok megmunkálására számos megmunkáló eljárás létezik (határozott vagy határozatlan élű, abrazív szerszám használata), amikor nagy pontosságra van szükség. A különböző eljárások eltérő felületi topográfiát eredményezhetnek az alkatrészen. Az alkatrészek funkcionális követelményei eltérőek lehetnek, ezért vizsgálni kell a megmunkálás utáni topográfiai jellemzőket [11, 27].

Kísérleteinkben három alkatrész belső hengeres felületét (F1, F2 és F3) keményesztergálással munkáltuk meg. A forgácsolási kísérleteket egy EMAG VDC 400 típusú keménymegmunkáló központon végeztük. Az alkalmazott lapka CCGW 09T308 NC2 típusú volt, a szerszámtartó pedig E25T-SCLCR 09-R típusú. A forgácsolási adatokat a 14. táblázat foglalja össze.

14. táblázat: Forgácsolási adatok

Forgácsolási adat	Megmunkált felület		
	S1	S2	S3
a_p [mm]	0,2		
n [1/min]	615		
f [mm/ford]	0,1	0,2	0,3

A felületi érdesség mérését egy AltiSurf 520 mérőgépen végeztem CL2 típusú optikai szenzorral, amelynek névleges mérési tartománya 0-300 μm . A felbontás a z tengely mentén 0,012 μm , az x és y tengely mentén pedig 5 μm volt. A letapogatott terület 4,8 \times 2,8 mm volt. A kiértékeléshez Gauss-szűrést alkalmaztam, a határhullámhossz (cut-off) $\lambda_c = 0,8$ mm volt. A területi paraméterek kiértékeléséhez 2 \times 2 mm-es területet vettem figyelembe. A 3D paraméterek elemzéséhez az ISO 25178 szabványt vettem figyelembe. Az elemzett funkcionális paramétereket az EUR 15178N szabvány határozza meg.

A legegyszerűbb információt a magassági paraméterek csoportján belül a maximális csúcsmagasság (Sp) és a maximális völgymélység (Sv) szolgáltatja. A nagyobb maximális csúcsmagasság viszonylag hosszú kopási fázisra, a nagyobb maximális völgymélység pedig nagyobb kenőanyagtartó-képességre utal. A ferdeségi (Ssk) és a lapultsági (Sku) paraméterek szintén magassági paramétereknek tekinthetők. A negatív Ssk , pl. egy polírozott felület, jobb kenőanyagtartó képességet jelent az erősen csúcsos felületek pozitív értékeihez képest. Nulla vagy negatív Ssk érték esetén a hordfelület nagyobb, ezért kopásállósága is nagyobb [28]. Ezt a hatást fokozza a 3 vagy annál kisebb Ssk érték, ami viszonylag kitöltött felületre utal [29].

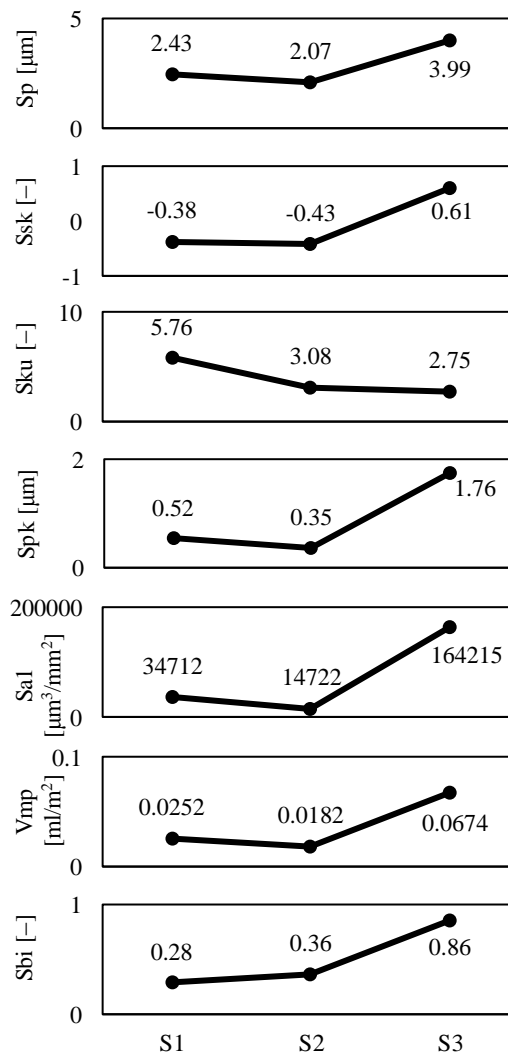
Az Abbott-Firestone görbe és a hozzá tartozó Sk paraméterek (2. ábra) jellemzően egy felület funkcionális és tribológiai tulajdonságainak elemzését segítik [30]. Maga a görbe alakja felhívja a figyelmet néhány figyelemre méltó topográfiai jellemzőre. Egy véletlenszerű (izotróp) felület, pl. a talaj görbéje teljesen analóg a normális eloszlás görbéjével. Periodikus, pl. keménysztergált felületek esetén a görbe gradiensének változása egyenetlen. A felületi csúcsokat csökkentő vagy megszüntető eljárások, pl. a gyémántvasalás, platószerű topográfiát és kitöltött felületet eredményeznek [31, 32]. Ebben az esetben, mivel a felületi csúcsok anyagmennyisége viszonylag alacsony, a felület kopásállósága nagyobb [13]. Az Sk paraméterek tekintetében a redukált csúcsmagasság (Spk) értéke alacsony. A redukált völgymélység (Svk) növekedése nagyobb kenőanyagtartó képességet jelez [33]. A Sk paraméterek elemzése során a csúcsok anyagterfogata ($Sa1$) és a völgyek üres térfogata ($Sa2$) is jelentős információt hordoz [34].

Bár a térfogatparaméterekre hasonló megállapítások érvényesek, ez a paramétercsoport pontosabban méri a csúcs- és völgyzónák nagyságát. Minél kisebb a csúcs anyagterfogat (Vmp), annál jobb a kopásállósága, továbbá minél nagyobb a mag üres térfogata (Vvc) és a völgy üres térfogata (Vvv), annál jobb a kenőanyag megtartó képessége [13]. Az úgynevezett funkcionális indexek kevésbé ismertek, ritkábban alkalmazzák őket. Ahelyett, hogy az Abbott-Firestone-görbéből származtatnák őket, inkább a felületek teherviselő és kenőanyag megtartó képességével jellemzik őket. Minél magasabb a felület teherbírás indexe (Sbi), annál nagyobb a teherviselő képessége, míg minél magasabb a mag kenőanyag megtartó (Sci) és a völgy kenőanyag megtartó (Svi) indexe, annál jobb a kenőanyag megtartó képessége. Ezeket a tribológiai tulajdonságokat a 15. táblázat foglalja össze:

15. táblázat. A tribológiai tulajdonságokat meghatározó paraméterek változásainak hatása

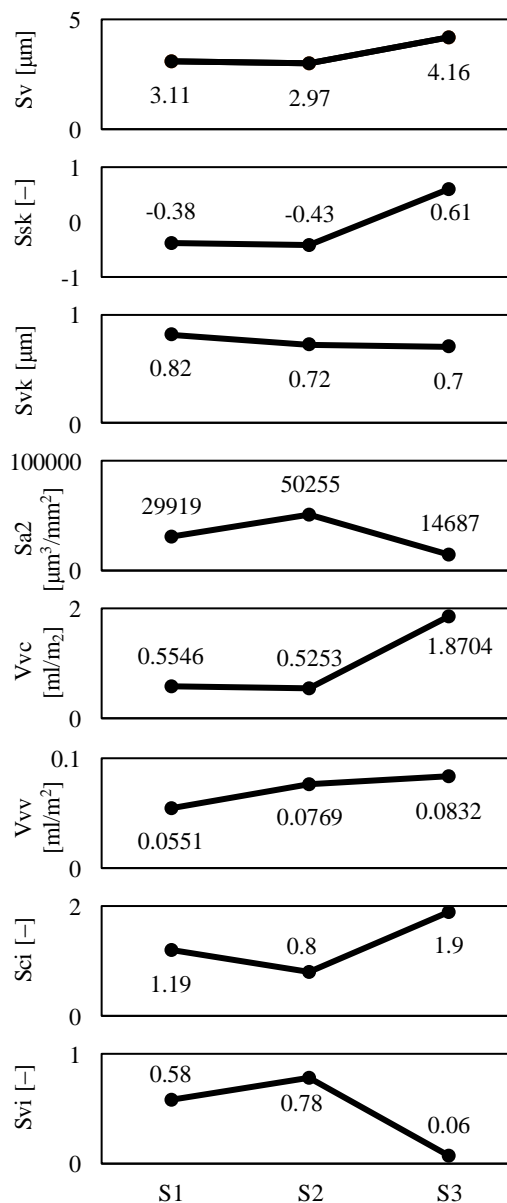
Topográfiai paraméter változása	Sp : ↓; Ssk : ↓ / ≤0; Sku : ↓ / <3; Spk : ↓; $Sa1$: ↓; Vmp : ↓; Sbi : ↑	Sv : ↑; Ssk : ↓ / ≤0; Svk : ↑; $Sa2$: ↑; Vvc : ↑; Vvv : ↑; Sci : ↑; Svi : ↑
Tribológiai jellemző változása	A kopásállóság és / vagy a teherviselő képesség növekszik.	Kenőanyag megtartó képesség növekszik.

A 25. ábra a kopásállóságról információt adó 3D paramétereket foglalja össze az elemzett felületek esetén. Az Sp , Spk , $Sa1$ és Vmp alacsonyabb értékei jobb kopásállóságra utalnak. Mind a négy paraméter esetén megállapítható, hogy az $f = 0,2$ mm/ford mellett megmunkált S2 felület a legkopásállóbb, az $f = 0,3$ mm/ford mellett megmunkált S3 felület pedig a legkevésbé kopásálló. Ugyanez figyelhető meg az Ssk paraméter alapján is. Az Sku paraméter alapján azonban a leginkább kopásálló felület az S3, amelyet $f = 0,3$ mm/ford előtolással munkáltunk meg. A felületet az Sbi paraméterrel egy másik módszer szerint jellemezzük: az Sq paraméter és a felület felső 5%-ában lévő anyagterefogat hányadosaként számoljuk ki. A nagy előtolással (0,3 mm/ford) megmunkált felület az első helyen áll a kopásállóság szempontjából. Meg kell jegyezni, hogy az elemzett paraméterek közül az Sp és Spk értékek hosszértékek, az $Sa1$ és Vmp térfogatértékek, míg az Ssk , Sku és Sbi dimenzió nélküli mérőszámok. Ha a Vmp térfogatparamétert tekintjük bázisnak korszerűsége és pontossága miatt, akkor a kopásállóság szempontjából a felületek sorrendje S2, S1 és S3. Ezt a Sp , Spk , $Sa1$ és Ssk paraméterek sorrendje is megerősíti.



25. ábra: A kopásállóságot jellemző 3D-s paraméterek

A felületek kenőanyag megtartó képességét jellemző paramétereket a 26. ábra foglalja össze. Az S_v , S_{vk} , $Sa2$, V_{vv} és S_{vi} paraméterek a völgyzónát jellemzik, és értékük növekedésével a kenőanyag megtartó képesség nő. A magzónát a V_{vc} és S_{ci} paraméterek jellemzik, a nagyobb értékek nagyobb kenőanyag megtartó képesség jeleznek. Ez a tulajdonság alacsony vagy negatív S_{sk} értékek esetén jobb. A felületek sorrendjét illetően eltérések figyelhetők meg, amelyek a paraméterek eltérő meghatározásából vezethetők le. Ha a V_{vv} paramétert tekintjük bázisnak, akkor a felületek sorrendje S3, S2, majd S1. Ezt más paraméterek nem erősítik meg. A völgyzónát tekintve az S_{sk} , $Sa2$, majd S_{vi} paraméterek azonos sorrendet eredményeznek, azaz S2, S1, majd S3. A magzóna kenőanyag megtartó képessége, azaz a V_{vc} paraméter alapján a sorrend S3, S2, majd S1. Ezt a sorrendet a magzóna másik paramétere, az S_{ci} is megerősíti.



26. ábra: A kenőanyag-megtartó képességet jellemző 3D-s paraméterek

A 16. táblázat a felületek sorrendjét a kopásállóságra és a kenőanyag megtartó képességre vonatkozó, fentebb részletezett megállapítások alapján foglalja össze.

16. táblázat: A felületek sorrendje az elemzett tribológiai tulajdonságok és érdekességi paraméterek alapján

Csúcs paraméter	Rangsor	Völgy paraméter	Rangsor	Magzóna paraméter	Rangsor
<i>Sp</i>	S2 > S1 > S3	<i>Sv</i>	S3 > S1 > S2	<i>Vvc</i>	S3 > S1 > S2
<i>Ssk</i>	S2 > S1 > S3	<i>Ssk</i>	S2 > S1 > S3	<i>Sci</i>	S3 > S1 > S2
<i>Sku</i>	S3 > S2 > S1	<i>Svk</i>	S1 > S2 > S3		
<i>Spk</i>	S2 > S1 > S3	<i>Sa2</i>	S2 > S1 > S3		
<i>Sa1</i>	S2 > S1 > S3	<i>Vvv</i>	S3 > S2 > S1		
<i>Vmp</i>	S2 > S1 > S3	<i>Svi</i>	S2 > S1 > S3		
<i>Sbi</i>	S3 > S2 > S1				

Az érdekességi csúcsokat értékelő és a kopásállóságot jelző paraméterek (*Sp*, *Ssk*, *Spk*, *Sa1* és *Vmp*) alapján a 0,2 és 0,3 mm/ford előtolással keményesztergált felületek a legkevésbé kopásállóak. A többi paraméter különböző sorrendeket eredményezett, ami azok számítási módjával magyarázható.

A felületek sorrendje a magzóna kenőanyag megtartó képességet jelző paraméterei (*Vvc*, *Sci*) tekintetében azonos: a 0,3 és 0,2 mm/ford előtolással megmunkált felületek mutatják rendre a legjobb, illetve a legrosszabb kenőanyag megtartó képességet. A felületek sorrendje a völgyzóna kenőanyag megtartó képességet jelző paraméterei (*Ssk*, *Sa2* és *Svi*) tekintetében azonos: a 0,2 és 0,3 mm/ford előtolással megmunkált felületek mutatják rendre a legjobb, illetve a legrosszabb kenőanyag megtartó képességet. A többi paraméter különböző sorrendeket eredményezett, ami azok számítási módjával magyarázható.

4.2 Forgácsolási adatok hatása a funkcionális tulajdonságokat meghatározó topográfiai paraméterekre

Vannak olyan forgácsolási technológiák, amelyek jellemzően képlékenyalakítással „távolítják el” a felületi csúcsokat, ami platószerű felületeket eredményez [31, 32], és következésképpen csökkentett anyaghányadot a felület csúcszónájában, ami megnövekedett kopásállósághoz vezet. [13]. Az *Sp* és *Sv* paraméterek a kopásállóságról, illetve a kenőanyag megtartó képességről adnak információt. A kisebb maximális csúcsmagasság nagyobb kopásállóságot, a nagyobb maximális völgymélység pedig nagyobb kenőanyag megtartó képességet eredményez [40].

A tribológiai tulajdonságokat illetően az ún. térfogatparaméterek szolgálnak a csúcs- és völgyzóna tulajdonságainak jellemzésére. Korábban az Abbott-Firestone görbén alapuló *Sk* elemzést (paramétercsoport) széles körben használták. Az e csoportba tartozó *Sa1* és *Sa2* paraméterek szolgáltatnak információt a csúcs- és völgytérfogatról. Újabban a *Vmp* és a *Vvv* értékeket használják. Ezek pontos 3D térfogat

paraméterek, amelyek a csúcs anyaghányadát és a völgy térfogatát mérik. Az alacsonyabb V_{mp} értékek nagyobb kopásállóságot, a magasabb V_{vv} magasabb kenőanyag megtartó képességet jelez [13].

Forgácsolási kísérletek eredményeképp a megmunkált felületek 3D-s topográfiai mérését végeztem el, hogy elemezzek néhány tribológiai sajátosságot jellemző topográfiai paramétert. Keménysztergálást és köszörülést hasonlítottam össze. A kísérletek során a forgácsolási adatokat teljes faktoriális kísérletterv alapján határoztam meg, hogy elemezzem a topográfiai paraméterekre gyakorolt hatásukat, majd minden egyes paraméterre válaszfüggvényt határoztam meg. A forgácsolási adatok és a topográfiai paraméterek közötti kapcsolatok erősségét a determinációs együtthatóval fejeztem ki. A megmunkált anyag 16MnCr5 volt.

A kísérleteket egy Optiturn S60 típusú CNC esztergán és egy KE 250-04 típusú univerzális köszörűgépen végeztem. A keménysztergáláshoz használt CBN lapka típusa CNGA 120408TA4, a szerszámszár pedig CLNR 2525M12 volt. A köszörüléshez használt korong KA32M5KE típusú kerámia kötésű korund volt. Külső átmérője 400 mm, szélessége 63 mm volt. Keménysztergálásnál a forgácsolósebességet (v_c), a fogásmélységet (a_p) és az előtolást (f), köszörülésnél pedig az beszűrősebességet (v_{FR}) és a munkadarab fordulatszámát (n) változtattam. A kísérleti beállításokat és technológiai adatokat a 17. táblázat foglalja össze.

17. táblázat: A technológiai paraméterek értékei

Eljárás	Forgácsolási paraméter		Beállítás			
			1	2	3	4
Keménysztergálás	fogásmélység	a_p [mm]	0,05	0,1	0,2	0,3
	Forgácsolósebesség	v_c [m/min]	60	90	120	150
	Előtolás	f [mm/rev]	0,05	0,1	0,15	0,2
Köszörülés	Beszűrősebesség	v_{FR} [mm/s]	0,07	0,13	0,19	0,30
	Munkadarab fordulatszám	n [1/min]	31,5	45	63	90

Az érdességmérésnél a kiértékelési terület $2,45 \text{ mm} \times 2,45 \text{ mm}$ volt. Az elemzett érdességi paraméterek válaszfüggvényeit mind a keménysztergált, mind a köszörült felületekre meghatározták. A válaszfüggvényekben a független változók (forgácsolási paraméterek) együtthatói információt adnak arról, hogy milyen mértékben és irányban befolyásolják a forgácsolási paraméterek az érdességi paraméter értékét. A forgácsolási paraméterek eltérő nagyságrendjei miatt azonban a determinációs együttható pontosabb információt nyújt. A determinációs együttható (R^2) a független (pl. a_p , v_c) és a függő (pl. S_a , S_z) változók közötti kapcsolat erősségéről tájékoztat, azaz megmutatja, hogy az előbbi milyen mértékben határozza meg (magyarázza) százalékos formában az utóbbit. A többszörös determinációs együttható arról tájékoztat, hogy a tényleges értékek és a válaszfüggvény által megjósolt értékek között milyen erősség van. A kapcsolat rendkívül erősnek tekinthető, ha $0,81 \leq R^2 < 1$; erősnek, ha $0,49 \leq R^2 < 0,81$; közepesnek, ha $0,16 \leq R^2 < 0,49$; gyengének, ha $0,04 \leq R^2 < 0,16$ és rendkívül gyengének, ha $R^2 < 0,04$.

A válaszfüggvény formáját illetően a kvázilineáris, a kvadratikus és a köbös formát hasonlítottam össze, és a legmagasabb többszoros determinációs együtthatót a köbös forma esetében kaptam. A keménysztergálásra és a köszörülésre vonatkozó köbös formákat a (7) és (8) egyenletek írják le, a különböző topográfiai paraméterekre az együtthatókat a 18. és 19. táblázat foglalja össze.

$$\begin{aligned}
y = & b_0 + b_1 a_p + b_2 v_c + b_3 f + b_{11} a_p^2 + b_{22} v_c^2 + b_{33} f^2 + b_{111} a_p^3 \\
& + b_{222} v_c^3 + b_{333} f^3 + b_{12} a_p v_c + b_{13} a_p f + b_{23} v_c f \\
& + b_{112} a_p^2 v_c + b_{113} a_p^2 f + b_{221} v_c^2 a_p + b_{223} v_c^2 f \\
& + b_{332} f^2 a_p + b_{331} f^2 v_c + b_{123} a_p v_c f
\end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned}
y = & b_0 + b_1 n + b_2 v_{FR} + b_{11} n^2 + b_{22} v_{FR}^2 + b_{111} n^3 + b_{222} v_{FR}^3 \\
& + b_{12} v_{FR} n + b_{112} n^2 v_{FR} + b_{122} v_{FR}^2 n
\end{aligned} \tag{8}$$

18. táblázat: Az érdeségi paraméterek válaszfüggvényeinek együtthatói keménysztergálás esetén

	<i>Sa</i>	<i>Sz</i>	<i>Vmp</i>	<i>Vvv</i>	<i>Sp</i>	<i>Sv</i>	<i>Ssk</i>	<i>Sku</i>
b_0	1,37	-6,75	0,04	0,07	-9,61	3,13	-0,77	-1,18
b_1	-15,53	-90,97	-0,08	0,08	-71,76	-23,91	-8,07	26,96
b_2	-0,02	0,27	0,00	0,00	0,35	-0,08	0,02	0,19
b_3	-1,45	110,72	-0,11	-0,34	74,11	24,05	10,36	-73,80
b_{11}	120,34	640,51	1,17	2,35	464,84	202,58	36,86	-164,53
b_{22}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
b_{33}	37,10	-814,11	1,28	2,10	-602,44	-108,37	-4,12	490,98
b_{111}	-252,93	-1237,09	-3,65	-8,35	-889,97	-385,09	-60,37	249,15
b_{222}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
b_{333}	-28,29	2269,98	2,15	0,64	1656,12	397,07	-104,12	-1389,92
b_{12}	-0,03	-0,04	0,00	-0,01	0,06	-0,11	0,05	0,16
b_{13}	3,85	369,31	-0,61	3,02	280,67	99,92	8,09	-80,07
b_{23}	-0,05	-0,69	0,00	0,00	-0,36	-0,34	-0,02	0,26
b_{112}	0,11	0,16	0,00	0,02	0,13	0,00	-0,06	-0,36
b_{113}	-34,96	-1016,36	0,37	-9,17	-771,72	-270,11	42,44	317,60
b_{221}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
b_{223}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
b_{331}	57,43	47,81	4,90	3,49	71,17	-32,99	-117,26	63,09
b_{332}	-0,10	0,80	-0,01	-0,02	0,56	0,07	0,29	0,86
b_{123}	0,07	0,05	0,00	0,00	-0,16	0,21	-0,01	-0,53

19. táblázat: Az érdeségi paraméterek válaszfüggvényeinek együtthatói köszörülés esetén

	<i>Sa</i>	<i>Sz</i>	<i>Vmp</i>	<i>Vvv</i>	<i>Sp</i>	<i>Sv</i>	<i>Ssk</i>	<i>Sku</i>
<i>b</i> ₀	2,74	47,76	0,11	0,40	49,22	-1,46	3,99	-0,66
<i>b</i> ₁	-0,05	-3,88	-0,01	-0,02	-3,90	0,02	-0,37	-2,24
<i>b</i> ₂	-170,01	8045,68	8,75	15,73	6467,88	1577,78	535,11	8856,34
<i>b</i> ₁₁	0,00	0,06	0,00	0,00	0,06	0,00	0,01	0,04
<i>b</i> ₂₂	7462,72	-561230,92	-346,53	-512,09	-426625,61	-134604,82	-26412,82	-506380,38
<i>b</i> ₁₁₁	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>b</i> ₂₂₂	-92984,08	10903134,74	6396,40	8736,53	7982419,09	2920707,30	476447,27	9328540,86
<i>b</i> ₁₂	0,32	50,70	-0,10	-0,34	31,19	19,51	-3,33	-14,85
<i>b</i> ₁₁₂	0,01	-0,12	0,00	0,00	-0,07	-0,05	0,03	0,19
<i>b</i> ₁₂₂	-24,57	-995,25	-0,34	0,04	-609,55	-385,70	-17,46	-338,71

A 20. táblázat az elemzett eljárások és érdeségi paraméterek determinációs együtthatóit foglaltam össze. Megállapítható, hogy a keménysztergálásnál az előtolás az érdeségi paraméterek legerősebb befolyásoló tényezője. Az R^2 értékei 0,201 és 0,650 között változnak, azaz az összefüggések erőssége erős vagy közepes. A fogásmélység és a forgácsolósebesség hatását illetően az R^2 értékek gyenge összefüggéseket mutatnak. A köszörülésnél a legnagyobb hatása a forgácsolósebességnek van az érdeségi értékekre. Azonban az R^2 értékek csupán 0,005 és 0,269 között változnak. Ez azt jelenti, hogy a kapcsolat viszonylag gyenge. A többtényezős determinációs együtthatót elemezve, keménysztergálásnál 0,483 és 0,912 között, köszörülésnél pedig 0,457 és 0,842 között változik. Ezek főként erős vagy rendkívül erős kapcsolatokat mutatnak.

20. táblázat: Determinációs együtthatók összefoglalása

Vizsgált paraméter	A befolyásoló tényezők determinációs együtthatói					Többváltozós determinációs eh.	
	$R^2_{HT,ap}$	$R^2_{HT,vc}$	$R^2_{HT,f}$	$R^2_{G,vfR}$	$R^2_{G,n}$	R^2_{HT}	R^2_G
<i>Sa</i>	0,074	0,004	0,643	0,145	0,028	0,912	0,808
<i>Sz</i>	0,078	0,002	0,468	0,121	0,038	0,784	0,787
<i>Vmp</i>	0,048	0,016	0,639	0,269	0,068	0,875	0,815
<i>Vvv</i>	0,022	0,018	0,292	0,120	0,121	0,741	0,574
<i>Sp</i>	0,061	0,004	0,383	0,082	0,001	0,698	0,842
<i>Sv</i>	0,104	0,001	0,519	0,073	0,196	0,826	0,457
<i>Ssk</i>	0,002	0,008	0,650	0,015	0,044	0,764	0,649
<i>Sku</i>	0,010	0,002	0,201	0,005	0,000	0,483	0,738

A topográfiai paraméterek előrejelzésére a köbös típusú válaszfüggvény jól alkalmazható. A kapott determinációs együtthatók (R^2) a keménysztergálás esetén 0,48 és 0,91 között, a köszörülés esetén pedig 0,46 és 0,84 között változtak. A topográfiát befolyásoló legfontosabb forgácsolási paraméter keménysztergálásnál az előtolás (*f*), köszörülésnél pedig az előtoló sebesség (v_{fR}). Az egytényezős determinációs

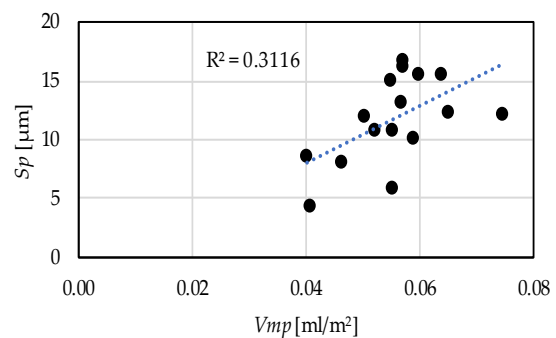
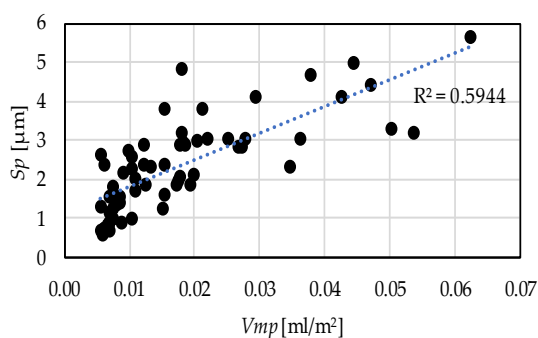
együtthatók keménysztergálásnál 0,2 és 0,65 között, köszörülésnél pedig 0,05 és 0,27 között változnak. A viszonylag alacsony abszolút értékek oka a válaszfüggvény szerkezete.

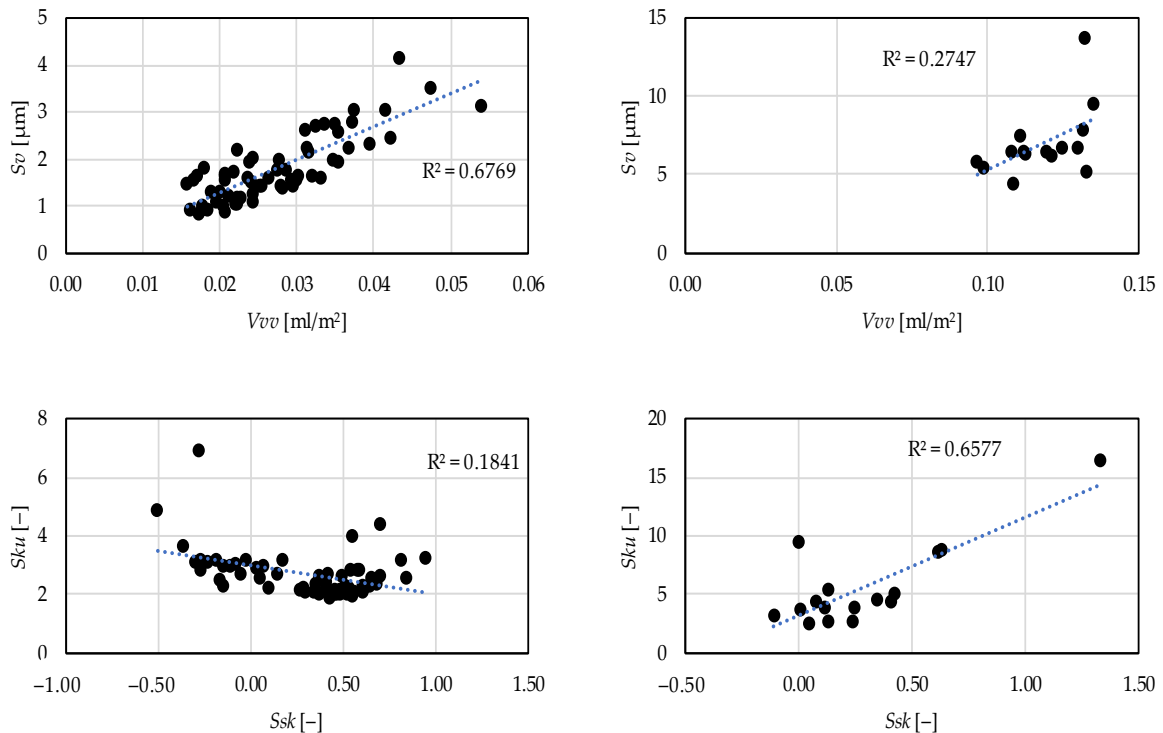
4.3 A megmunkált felületek funkcionális sajátosságait jellemző paraméterek közötti összefüggések

Az előző részben bemutatott kísérlet és elemzés kapcsán egy további vizsgálat középpontjában a felületi textúra paramétere, a ferdeség (Ssk) állt. Ehhez a paraméterhez több kutatási terület is kapcsolódik. Szlachetka et al. [36] az Ssk és a fizikai-mechanikai tulajdonságok közötti összefüggéseket elemezték. Flack et al. [37] a paraméter súrlódásra gyakorolt hatását, Sedlacek et al. [38] pedig a kopási mechanizmusokat vizsgálta. Bingley et al. [39] a kenőanyagok hatásának elemzése során kapott eredményeket. Számos tanulmány jelent meg, amely az Ssk és más paraméterek közötti összefüggéseket azonosítja, pl. [29].

A ferdeségi paraméter a felület pontjai magassági eloszlásának harmadrendű standardizált momentuma, ami magassági eloszlásfüggvény szimmetriájáról vagy aszimmetriájáról ad információt [40, 41]. A nulla ferdeségű értékű felület azt jelenti, hogy a magasságeloszlás szimmetrikus. Kimutatták, hogy a felületek fizikai viselkedése és tribológiai tulajdonságai [42], valamint az érintkezési mechanikai kérdései szoros kapcsolatban állnak a magasságeloszlás magasabb rendű momentumaival, ezért érdemes ezeket részletesen elemezni [43, 44]. Emellett megállapították, hogy az Ssk paraméter viszonylag érzékeny a mély völgyekre vagy a magas csúcsokra [45, 46].

Az előző pontban részletezett kísérlet és mérés további eredményeit az alábbiakban foglaltam össze. A paraméterek megbízhatósága szempontjából alapvető fontosságú a felület azonos funkcionális jellemzőit meghatározó paraméterek közötti erős korreláció. A 27. ábrán az Sp és a Vmp , az Sv és Vvv , illetve az Sku és Ssk paraméterek közötti kapcsolat látható keménysztergálás és köszörülés esetén. A kapcsolatok erősségéről a diagramokon feltüntetett determinációs együtthatók informálnak.





27. ábra: A vizsgált paraméterek közötti összefüggések (a) keménysztergálás és (b) köszörülés esetén

A keménysztergálás kísérleti eredményei alapján szoros kapcsolat van a csúcszóna anyagtérfogata (Vmp) és a maximális csúcsmagasság (Sp) paraméterek között ($R^2 = 0,59$), valamint a völgyzóna ürestérfogata (Vvv) és a maximális völgymélység (Sv) paraméterek között ($R^2 = 0,68$). Ezért mindkét paraméter megbízhatóan alkalmazható a felület tribológiai jellemzőkkel kapcsolatos sajátosságainak értékelésére. Ugyanez nem érvényes a köszörülésre a 0,31, illetve 0,27 értékű determinációs együtthatók alapján. A köszörülési kísérlet eredményi alapján a ferdeségi (Ssk) és a lapultsági (Sku) paraméterek között szoros kapcsolat áll fenn. A determinációs együttható 0,66. Ez a keménysztergálásra nem érvényes ($R^2 = 0,18$).

4.4 A felületi aszimmetria, mint kedvező tulajdonság a felület funkcionalitása szempontjából

Az előző pontokban bemutatott átfogó forgácsolási kísérletek további eredménye a ferdeségi mérőszám (Ssk) további részletes elemzése. Ez a paraméter a felület pontjai eloszlásának a szimmetriájáról tájékoztat. Vizsgáltam az összefüggéseket ezen paraméter és a két térfogati paraméter között: Vmp és Vvv .

A 0,1 mm-es fogásmélységgel esztergált felületek Ssk - Vmp paraméterei esetében erős a korreláció. A 0,2 mm-es fogásmélységgel esztergált felületek Ssk - Vvv paraméterei esetében gyenge a korreláció. A köszörült felületek Ssk - Vvv paraméterei esetében a korreláció negatív és gyenge. A többi kísérleti beállításban és paraméterpár esetén pozitív közepes korrelációt kaptam. Ezek az eredmények megerősítik, hogy az Ssk

paraméter alkalmas az érintkező felületek tribológiai tulajdonságainak előrejelzésére [47].

Meghatároztam ezen összefüggések kvadratikus regressziós függvényeit is (21. táblázat). A kapcsolat erőségét a determinációs együttható alapján határoztam meg. Az Ssk és a Vmp közötti korreláció rendkívül erős a 0,1 mm fogásmélység mellett esztergált felületek esetén. Az Ssk és a Vvv közötti korreláció a 0,05 mm-es fogásmélység esetén erős, az Ssk és a Vvv közötti korreláció pedig gyenge a köszörült felületek esetén. A többi beállításban és paraméterpár mellett közepes erősségű a korreláció.

21. táblázat: A ferdeség (Ssk) és a térfogatparaméterek (Vmp és Vvv) közötti összefüggések.

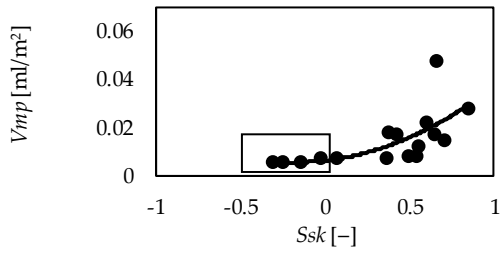
Eljárás		Kvadratikus regressziós függvény	Determinációs együttható (R^2)
Keményszergálás	$a_p = 0,05$ mm	$Vmp = 0,0228Ssk^2 + 0,0078Ssk + 0,0063$	0.4323
		$Vvv = 0,0213Ssk^2 + 0,0022Ssk + 0,0185$	0.5334
	$a_p = 0,1$ mm	$Vmp = 0,0226Ssk^2 + 0,0089Ssk + 0,0069$	0.895
		$Vvv = 0,0068Ssk^2 + 0,0048Ssk + 0,023$	0.482
	$a_p = 0,2$ mm	$Vmp = -0,0336Ssk^2 + 0,0343Ssk + 0,0182$	0.238
		$Vvv = -0,0995Ssk^2 + 0,0476Ssk + 0,0428$	0.187
$a_p = 0,3$ mm	$Vmp = 0,0716Ssk^2 + 0,0023Ssk + 0,0042$	0.466	
	$Vvv = -0,0064Ssk^2 + 0,0158Ssk + 0,0221$	0.20	
Köszörülés		$Vmp = -0,0071Ssk^2 + 0,0192Ssk + 0,0516$	0,2936
		$Vvv = 0,0047Ssk^2 - 0,0161Ssk + 0,1218$	0,1232

Ezen eredmények alapján megállapítható, hogy a ferdeségi (Ssk) paraméter iránymutatást ad a tribológiai tulajdonságokra, de bizonytalansága miatt nem olyan megbízható, mint az azonos tulajdonságokat leíró térfogatparaméterek.

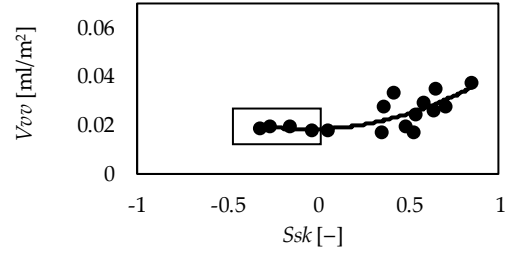
A keményszergált felületek Ssk értékeinél hasznos jelenséget figyeltem meg: a negatív Ssk -értékű felületeknél alacsony Vmp - és Vvv -értékek adódtak. Ezek szórása is viszonylag alacsony volt (22. táblázat). A paraméterértékek nem mutatnak tendenciát, és eközben a minimális Vmp - vagy Vvv -értékek közé tartoznak. Ez az összes keményszergált felületre érvényes, de a köszörült felületekre nem. A 28-32. ábrák ezt szemléltetik. A negatív Ssk értékekhez kapcsolódó alacsony Vmp és Vvv értékeket a téglalapok jelölik.

22. táblázat: A Vmp és Vvv értékek negatív Ssk értékekhez tartozó szórásai keményszergált felületeken.

	a_p [mm]			
	0.05	0.1	0.2	0.3
stdev_ Vmp	0,00072	0,0031	0,0014	0,0004
stdev_ Vvv	0,00094	0,0089	0,0025	0,0031

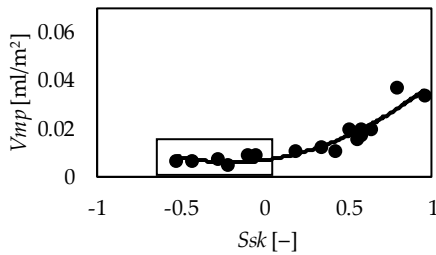


(a)

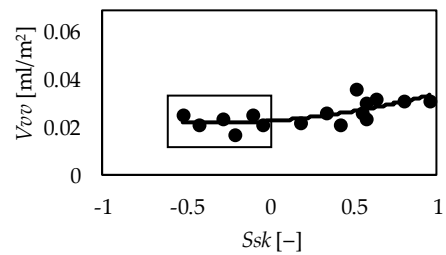


(b)

28. ábra: Negatív Ssk és alacsony (a) V_{mp} és (b) V_{zv} értékek keménysztergált felület esetén, ha $a_p = 0,5$ mm

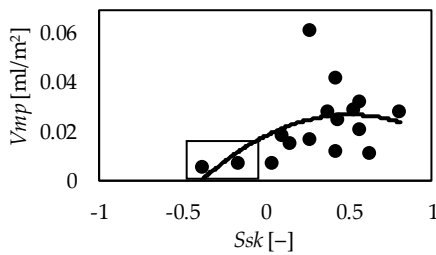


(a)

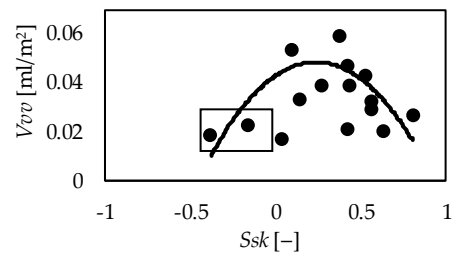


(b)

29. ábra: Negatív Ssk és alacsony (a) V_{mp} és (b) V_{zv} értékek keménysztergált felület esetén, ha $a_p = 0,1$ mm

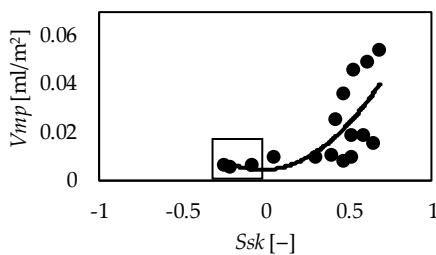


(a)

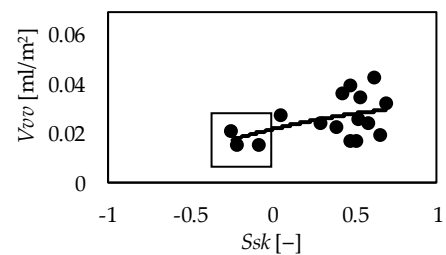


(b)

30. ábra: Negatív Ssk és alacsony (a) V_{mp} és (b) V_{zv} értékek keménysztergált felület esetén, ha $a_p = 0,2$ mm

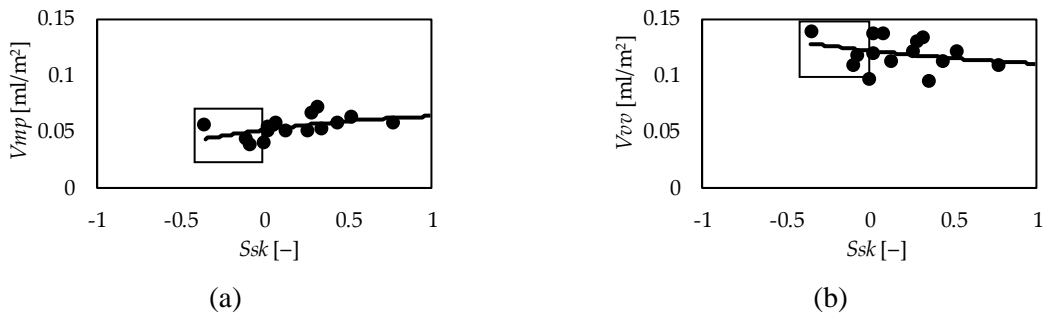


(a)



(b)

31. ábra: Negatív Ssk és alacsony (a) V_{mp} és (b) V_{zv} értékek keménysztergált felület esetén, ha $a_p = 0,3$ mm



32. ábra: Negatív Ssk és alacsony (a) Vmp és (b) Vvv értékek köszörült felület esetén

Ezen eredmények alapján elmondható, hogy a negatív Ssk értékek megbízható információt nyújtanak az alacsony Vmp és Vvv értékekről, ami tribológiai szempontból kedvezőek. Ugyanakkor a pozitív Ssk értékek erős bizonytalanságot mutatnak. Ennek a bizonytalanságnak az az oka, hogy az Ssk paraméter érzékeny a magas csúcsokra és mély völgyekre (a paraméter a magassági eloszlás harmadik momentuma). Megjegyzendő, hogy az Ssk értékek magasabbak nagyobb előtolások (ami a topográfia magasabb csúcsait eredményezi) mellett.

4.5 Saját munka és tézisek

4.5.1 Saját munka

Az aljárású sorrendváltatok vizsgálatában (3.1. fejezet) a Gyártástudományi Intézet munkatársai részt vettek, a topográfia vizsgálatok elvégzése és az ehhez kapcsolódó eredmények a saját munkám.

A fejezet további részeiben bemutatott vizsgálatok és eredmények a saját munkám.

4.5.2 A saját munka alapján megfogalmazott tézisek

10. tézis: Betétben edzhető anyag keménysztergált felületei estén vizsgáltam felületek funkcionális sajátosságait (kopásállóság és kenőanyagmegtartó-képesség) meghatározó topográfiai paramétereket és sorrendet határoztam meg az előtolás értéke alapján képzett változatokra az alapján, hogy egy adott előtolás mellett ezt a két funkcionális jellemzőt leíró topográfiai paraméterek milyen értéket vesznek fel. Ez a módszer hozzájárul a keménysztergálás technológiai paramétereinek meghatározásához funkcionális (tribológiai) tulajdonságokat figyelembevéve. [S11]

11. tézis: Részletesen vizsgáltam keménysztergált és beszűrő köszörüléssel megmunkált felületek forgácsolási adatainak funkcionális topográfiai paraméterekre gyakorolt hatását. Válaszfüggvényeket határoztam meg a vizsgált topográfiai paraméterekre és azok megbízhatóságát a determinációs együtthatók és a többváltozós determinációs együtthatók segítségével vizsgáltam. Megállapítottam, hogy a topográfiai paraméterek előrejelzésére a köbös típusú válaszfüggvény jól alkalmazható az adott kísérleti beállítások esetén. [S12]

12. tézis: Vizsgáltam az azonos célra kidolgozott funkcionális topográfiai paraméterek korrelációs kapcsolatát keménysztergált és köszörült felületek esetén. Igazoltam, hogy keménysztergálás esetén szoros kapcsolat van a csúcszóna anyagterfogata és a maximális csúcsmagasság között, valamint a völgyzóna ürestérfogata és a maximális völgymélység között. Ezért mindkét paraméter megbízhatóan használható a felület tribológiai jellemzőkkel kapcsolatos sajátosságainak értékelésére. Ugyanez nem érvényes a köszörülésre az adott kísérleti beállítások mellett. A köszörülési kísérlet eredményi alapján a ferdeségi és a lapultsági paraméterek között szoros kapcsolat áll fenn. Ez a keménysztergálásra nem volt érvényes az adott kísérleti beállítások mellett. [S12, 13]
13. tézis: Részletesen vizsgáltam a ferdeségi (Ssk) és térfogati paraméterek (Vmp és Vvv) közötti kapcsolatot keménysztergált és köszörült felületek esetén kvadratikus regressziós függvény segítségével és a determinációs együttható számításával. Megállapítottam, hogy a ferdeségi paraméter iránymutatást ad a tribológiai tulajdonságokra, de bizonytalansága miatt nem olyan megbízható, mint az azonos tulajdonságokat leíró térfogatparaméterek. [S13]
14. tézis: Megállapítottam továbbá, hogy a negatív ferdeségi paraméterértékek megbízható információt nyújtanak az alacsony Vmp és Vvv értékekről, amelyek tribológiai szempontból kedvezőek. A megállapítások az adott az adott kísérleti beállítások mellett érvényesek. [S13]

ÖSSZEFOGLALÁS

A tézisfüzetben összefoglalt kutatásokat elsősorban ipari igények ösztönözték. A megmunkálás hatékonysága, illetve a megmunkált felületek funkcionális tulajdonságainak javítása jelenleg is aktuális igény az ipar részéről. A 3D-s topográfia elemzés hatékonyságának vizsgálata ugyancsak az üzemi folyamatok racionalizálását célozza. Az eredményeim egy részét rangos folyóiratokban publikáltam és kiterjedt kutató hálózatban disszemináltam. Az eredmények egy része ipari megbízások formájában került hasznosításra.

A kutatásaim során elsősorban betétben edzhető acélok megmunkálási kísérleteit, illetve ilyen anyagok üzemi körülmények között történő gyártását vizsgáltam. A legfontosabb eredményeim:

Az anyagleválasztási hatékonyság témakörben (1-4. tézis):

- Belső hengeres felületek geometriai jellemzőinek hatása az anyagleválasztási sebességre.
- Az anyagleválasztási sebesség összehasonlítása sztenderd és wiper kialakítású lapkák esetén.
- Anyagleválasztási sebesség-alapú sorrend kialakítása keménymegmunkáló eljárásváltozatok között a felület geometriai jellemzőinek figyelembevételével.
- Marás forgácsolási adatainak hatása az anyagleválasztási sebességre.

A 3D-s felületi topográfia mérés módszertani vizsgálata témakörben (5-9. tézis):

- Módszerek kidolgozása a minimális kiértékelési terület nagyságára leró statisztikai jellemzők, regresszióelemzés és normalitásvizsgálat alkalmazásával.
- A 2D-s topográfiai paraméterek megbízhatóságának a vizsgálata.

Keménymegmunkált felületek funkcionális sajátosságai (10-14. tézis)

- Kopásállóságot és kenőanyag-megtartó képességet jellemző topográfiai paraméterek vizsgálata.
- Többváltozós regressziós modellek kidolgozása a felületek funkcionális jellemzőit leíró topográfiai paraméterek kapcsolatára.
- A megmunkált felületek aszimmetriájának és annak hatásának a vizsgálata.

A kutatómunka folytatását illetően jelenleg folyamatban van a harmadik terület (funkcionális tulajdonságok vizsgálata) mélyebb vizsgálata átfogó forgácsolási kísérletek formájában, melynek fókuszterületei:

- Különböző anyagminőségek összehasonlítása.
- Különböző határozott élű szerszámok összehasonlítása.
- Maradó feszültség, forgácsolóerő, kopás részletes vizsgálata a felületi integritás részletesebb jellemzésére.

SUMMARY

The research summarized in this thesis was driven mainly by industrial needs. The efficiency of machining and the improvement of the functional properties of machined surfaces are still a current demand from industry. Investigations of the efficiency of 3D topography analysis are also aimed at the rationalization of industrial processes. Some of my results have been published in prestigious journals and disseminated in an extensive research network. Some of the results have been used in the form of industrial projects.

My research has mainly focused on machining experiments of case hardened steels and the manufacturing of such materials under industrial conditions. My main results are:

Material removal efficiency (Theses 1-4):

- Effect of geometric characteristics of internal cylindrical surfaces on material removal rate.
- Comparison of material removal rates for standard and wiper inserts.
- Determination of material removal rate-based rank for hard machining process variations considering surface geometry.
- Effect of milling cutting data on material removal rate.

Methodological investigation of 3D surface topography measurement (Theses 5-9):

- Development of methods for estimating the size of the minimal evaluation area using statistical characteristics, regression analysis and normality analysis.
- Investigate the reliability of 2D topographic parameters.

Functional properties of hard-machined surfaces (Theses 10-14)

- Investigation of topographic parameters characterizing wear resistance and lubricant retention ability.
- Development of multivariate regression models for the relationship between topographic parameters describing the functional properties of surfaces.
- Investigation of the asymmetry of machined surfaces and its effects.

As a continuation of the research work, a deeper investigation of the third area (functional properties) is currently underway in the form of comprehensive machining experiments, with focus areas:

- Comparison of different material qualities.
- Comparison of different types of single-point tools.
- Detailed investigation of residual stress, cutting force and wear for a more detailed characterization of surface integrity.

HIVATKOZOTT SAJÁT PUBLIKÁCIÓK

- [S1] Kundrak, J.; Molnar, V.; Deszpoth, I.: *Analysis of machining time and material removal performance as factors influencing efficiency and profitability*. Lecture Notes in Mechanical Engineering, pp.268-279, 2018.
- [S2] Kundrak, J.; Molnar, V.; Deszpoth, I.: *Comparative Analysis of Machining Procedures*. Machines 6(2), art nr 13, 2018.
- [S3] Kundrak, J.; Deszpoth, I.; Molnar, V.: *Comparative Study of Material Removal in Hard Machining of Bore Holes*. Tehnicki Vjesnik-Technical Gazette 21(1), pp.183-189, 2014.
- [S4] Kundrak, J.; Molnar, V.; Deszpoth, I.: *MRR-Based Productivity Decisions in Hard Machining*. WSEAS Transactions on Environment and Development 14, pp.374-382, 2018.
- [S5] Kundrak, J.; Molnar, V.; Makkai, T.: *Anyagválasztási hatékonyság vizsgálata alumíniumötvözet homlokmarásánál*. Gépgyártás 58(1-2), pp.87-93, 2019.
- [S6] Kundrak, J.; Molnar, V.; Deszpoth, I.: *Productivity analysis of machining milled surfaces*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 448, art nr 012012, 2018.
- [S7] Molnar, V.: *Designation of Evaluation Area in Measuring 3D Surface Roughness*. Rezanie i Instrumenty v Tekhnologicheskikh Sistemah 93, pp.56-64, 2020.
- [S8] Molnar, V.: *Minimization Method for 3D Surface Roughness Evaluation Area*. Machines 9(9), art nr 192, 2021.
- [S9] Molnar, V.; Szabo, G.: *Designation of minimum measurement area for the evaluation of 3D surface texture*. Journal of Manufacturing Processes 83, pp.40-48, 2022.
- [S10] Kundrak, J.; Sztankovics, I.; Molnar, V.: *Accuracy and topography analysis of hard machined surfaces*. Manufacturing Technology 21(4), pp.512-519, 2021.
- [S11] Molnar, V.: *Tribology and Topography of Hard Machined Surfaces*. Rezanie i Instrumenty v Tekhnologicheskikh Sistemah 94, pp.49-59, 2021.
- [S12] Molnar, V.; Sztankovics, I.: *Analysis of Roughness Parameters Determining Tribological Properties in Hard Turned Surfaces*. Hungarian Journal of Industry and Chemistry 49(2), pp.77-84, 2021.
- [S13] Molnar, V.: *Tribological Properties and 3D Topographic Parameters of Hard Turned and Ground Surfaces*. Materials 15(7), art nr 2505, 2022.
- [S14] Molnar, V.: *Asymmetric Height Distribution of Surfaces Machined by Hard Turning and Grinding*. Symmetry 14(8), art nr 1591, 2022.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Tönshoff, H. K.; Arendt, C.; Ben Amor, R.: *Cutting of Hardened Steel*. Annals of the CIRP 49(2), pp.547-566, 2000.
- [2] Weinert, K.; Johlen, G.: *Kombinierte Bearbeitung durch Hartdrehen und Schleifen*. IDR Archiv 1, pp.137-144, 2003.
- [3] Revel, P.; Jouini, N.; Thoquenne, G.; Lefebvre, F.: *High precision hard turning of AISI 52100 bearing steel*. Precision Engineering 43, pp.24-33, 2016.
- [4] Das, D.K.; Sahoo, A.K., Das, R., Routara, B.C.: *Investigations on hard turning using coated carbide insert: Grey based Taguchi and regression methodology*. Procedia Materials Science 6, pp.1351-1358, 2014.
- [5] Galoppi, G. S.; Filho, M. S.; Batalha, G. F.: *Hard turning of tempered DIM 100Cr6 steel with coated and no coated CBN inserts*. Journal of Materials Processing Technology 179, pp.146-15, 2006.
- [6] Waikar, R. A.; Guo, Y. B.: *A comprehensive characterization of 3D surface topography induced by hard turning versus grinding*. Journal of Materials Processing Technology 197, pp.189-199, 2008.
- [7] Choi, Y.: *A comprehensive study of residual stress distribution induced by hard machining versus grinding*. Tribological Letters 36, pp.277-284, 2009.
- [8] Guo, Y. B.; Warren, A. W.: *The impact of surface integrity by hard turning vs. grinding on fatigue damage mechanisms in rolling contact*. Surface & Coatings Technology 203, pp.291-299, 2008.
- [9] Guo, Y. B.; Sahni, J.: *A comparative study of hard turned and cylindrically ground white layers*. Machine Tools & Manufacture 44, pp.135-145, 2004.
- [10] Klocke, F.; Brinkmeier, E.; Weinert, K.: *Capability Profile of Hard Cutting and Grinding Process*. Annals of the CIRP 54(2), pp.22-54, 2005.
- [11] Kundrák, J.; Mamalis, A. G.; Markopoulos A.: *Finishing of hardened boreholes: Grinding or Hard Cutting?* Materials and Manufacturing Processes 19(6), pp.979-993, 2004.
- [12] Mamalis, A.G.; Kundrak, J.; Gyani, K.: *On the Dry Machining of Steel Surfaces Using Superhard Tools*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 12(3), pp. 157-162, 2002.
- [13] Grzesik, W.; Zak, K.; Kiszka, P.: *Comparison of Surface Textures Generated in Hard Turning and Grinding Operations*. Procedia CIRP 13, pp.84–89, 2014.
- [14] Grzesik, W.; Rech, J., Zak, K.: *High-Precision Finishing Hard Steel Surfaces Using Cutting, Abrasive and Burnishing Operations*. Procedia Manufacturing 1, pp.619–627, 2015.
- [15] Legutko, S.; Zak, K.; Kudlacek, J.: *Characteristic of Geometric Structure of the Surface after Grinding*. MATEC Web of Conferences, art nr 02007, 2007.
- [16] Schmähling, J.; Hamprecht, F.A.; Hoffmann, D.M.P.: *A Three-Dimensional Measure of Surface Roughness based on Mathematical Morphology*. Technical Report from Multidimensional Image Processing, IWR University of Heidelberg, 2006.
- [17] Wojciechowski, S.; Twardowski, P.; Chwalczuk, T.: *Surface Roughness Analysis after Machining of Direct Laser Deposited Tungsten Carbide*. Journal of Physics: Conference Series 483, art nr 012018, 2014.
- [18] Novak, M.: *Surface quality of hardened steels after grinding*. Manufacturing Technology 11(1), pp.55–59, 2011.

- [19] Farsky, J.; Baksa, T.; Zetek, M.: *Grinding of Maraging Steel 1.2709 with SiC Grinding Wheels and Effect of Grinding Conditions on the Surface Roughness and Wear of the Wheels*. Manufacturing Technology 20(1), pp.18–22, 2020.
- [20] Ozel, T.; Karpat, Y.: *Predictive modeling of surface roughness and tool wear in hard turning using regression and neural networks*. International Journal of Machine Tools Manufacturing 45, pp.467–479, 2005.
- [21] Karpuschewski, B.; Kundrak, J.; Emmer, T.; Borysenko, D.: *A new strategy in face milling-inverse cutting technology*. Solid State Phenomena 261, pp.331–338, 2017.
- [22] Ferencsik, V.; Gal, V.: *FE Investigation of Surface Burnishing Technology*. Cutting & Tools in Technological System 93, pp.3–8, 2020.
- [23] Kundrak, J.; Gyani, K.; Felho, C.; Deszpoth, I.: *The effect of the shape of chip cross section on cutting force and roughness when increasing feed in face milling*. Manufacturing Technology 17(3), pp.335–342, 2017.
- [24] Sztankovics, I.; Kundrak, J.: *The characteristic parameters of the twist structure on cylindrical surfaces machined by turning procedures*. Applied Mechanics and Materials 693, pp.418–423, 2014.
- [25] Kundrak, J.; Sztankovics, I.; Gyani, K.: *Analysis of the Theoretical Values of Several Characteristic Parameters of Surface Topography in Rotational Turning*. World Academy of Science Engineering and Technology 8(5), pp.907–912, 2014.
- [26] Kundrak, J.: *The Scientific Principles of Increasing the Effectiveness of Inner Surfaces' Cutting with CBN Tools*. DSc Dissertation, p.368, 1996.
- [27] Kundrak, J.: *Alternative machining procedures of hardened steels*. Manufacturing technology 11(11), pp.32–39, 2011.
- [28] Karkalos, N.E.; Karmiris-Obratanski, P.; Kurpiel, S.; Zagorski, K.; Markopoulos, A.P.: *Investigation on the surface quality obtained during trochoidal milling of 6082 aluminum alloy*. Machines 9, art nr 75, 2021.
- [29] Kovacs, Z.; Viharos, Z.J.; Kodacsy, J.: *The effects of machining strategies of magnetic assisted roller burnishing on the resulted surface structure*. Material Science and Engineering 448, art nr 012002, 2018.
- [30] Chen, L.; Liu, Z.; Wang, B.; Song, Q.; Wan, Y.; Chen, L.: *Surface Characterization and Tribological Performance of Anodizing Micro-Textured Aluminum-Silicon*. Materials 12, art nr 1862, 2019.
- [31] Sagbas, A.: *Analysis and optimization of surface roughness in the ball burnishing process using response surface methodology and desirability function*. Advances in Engineering Software, 42, pp.992–998, 2011.
- [32] Zhu, L.; Guan, Y.; Wang, Y.; Xie, Z.; Lin, J.; Zhai, J.: *Influence of process parameters of ultrasonic shot peening on surface roughness and hydrophilicity of pure titanium*. Surface and Coatings Technology 317, pp.38–53, 2017.
- [33] Suha, A.I.; Polycarpou, A.A.; Conry, T.F.: *Detailed surface roughness characterization of engineering surfaces undergoing tribological testing leading to scuffing*. Wear 255, pp.556–568, 2003.
- [34] Wojciechowska, L.; Wieczorowski, M.; Mathia, T.G.: *Transition from the boundary lubrication to scuffing-the role of metallic surfaces morphology*. Wear 392-393, pp.39–49, 2017.
- [35] Skoczy, A.: *Selected Properties of the Surface Layer of C45 Steel Parts Subjected to Laser Cutting and Ball Burnishing*. Materials 13, art nr 3429, 2020.
- [36] Szlachetka, O.; Witkowska-Dobrev, J.; Baryla, A.; Dohojda, M.: *Low-density polyethylene (LDPE) building films - Tensile properties and surface morphology*. Journal of Building Engineering 44, art nr 103386, 2021.

- [37] Flack, K.A.; Schultz, M.P.; Barros, J.M.: *Skin friction measurements of systematically-varied roughness: Probing the role of roughness amplitude and skewness*. *Flow, Turbulence and Combustion* 104, pp.317–329, 2020.
- [38] Sedlacek, M.; Gregorcic, P.; Podgornik, B.: *Use of the roughness parameters S_{sk} and S_{ku} to control friction—A method for designing surface texturing*. *Tribology Transactions* 60, art nr 260–266, 2016.
- [39] Bingley, R.; Buttery, M.; Romera, R.F.: *The effect of surface production techniques on the tribological behaviour of fluid lubricants*. *Proceedings of the 18 European Space Mechanisms and Tribology Symposium, Munich, Germany, 18–20 September 2019*.
- [40] Yang, Y.; Knust, S.; Schwiderek, S.; Qin, Q.; Yun, Q.; Grundmeier, G.; Keller, A.: *Protein adsorption at nanorough titanium oxide surfaces: The importance of surface statistical parameters beyond surface roughness*. *Nanomaterials* 11, art nr 357, 2021.
- [41] Trzpiecinski, T.; Szpunar, M.; Dzierwa, A.; Zaba, K.: *Investigation of surface roughness in incremental sheet forming of conical drawpieces from pure titanium sheets*. *Materials* 15, art nr 4278, 2022.
- [42] Orrillo, P.A.; Santalla, S.N.; Cuerno, R.; Vazquez, L.; Ribotta, S.B.; Gassa, L.M.; Mompean, F.J.; Salvarezza, R.C.; Vela, M.E.: *Morphological stabilization and KPZ scaling by electrochemically induced co-deposition of nanostructured NiW alloy films*. *Scientific Reports* 7, art nr 17997, 2017.
- [43] Pawlus, P.; Reizer, R.; Zelasko, W.: *Prediction of parameters of equivalent sum rough surfaces*. *Materials* 13, art nr 4898, 2020.
- [44] Yu, N.; Polycarpou, A.A.: *Combining and contacting of two rough surfaces with asymmetric distribution of asperity heights*. *Journal of Tribology* 126, pp.225–232, 2004.
- [45] Naylor, A.; Talwalkar, S.C.; Trail, I.A.; Joyce, T.J.: *Evaluating the surface topography of pyrolytic carbon finger prostheses through measurement of various roughness parameters*. *Journal of Functional Biomaterials* 7, art nr 9, 2016.
- [46] Gadelmawla, E.S.; Koura, M.M.; Maksoud, T.M.A.; Elewa, I.M.; Soliman, H.H.: *Roughness parameters*. *Journal of Materials Processing Technology* 123, pp.133–145, 2002.
- [47] Korzynski, M.; Dudek, K.; Palczak, A.; Kruczek, B.; Kocurek, P.: *Experimental models and correlations between surface parameters after slide diamond burnishing*. *Measurement Science Review* 18, pp.123–129, 2018.