

KÖRELŐTOLÁSÚ ESZTERGÁLÁSSAL VÉGZETT BEFEJEZŐ MEGMUNKÁLÁS VIZSGÁLATA

Sztankovics István 

adjunktus, Miskolci Egyetem, Gyártástudományi Intézet

3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: istvan.sztankovics@uni-miskolc.hu

Absztrakt

A rotációs esztergálás különleges kinematika és szerszám alkalmazásával kínál megoldási lehetőséget a hagyományos esztergálás bizonyos korlátozó jellemzőire. Ebben a cikkben rotációs esztergáláskor vizsgáltam a forgácsoló erő és a felületi érdesség változását az előtolás növelésekor. A forgácsolási kísérleteket hagyományos és csavarvonal élű szerszámmal is elvégeztem. Vizsgáltam a forgácsolóerő komponenseinek maximális értékeit, a fajlagos erőket, az átlagos érdességet és az átlagos egyenetlenségmagasságot. Megállapítottam, hogy a körelőtolás alkalmazásával a passzív erő és a felületi érdesség hatékonyan csökkenthető a hagyományos esztergáláshoz képest.

Kulcsszavak: felületi érdesség, forgácsoló erő, körelőtolás, rotációs esztergálás

Abstract

Rotational turning offers a solution opportunity to some of the limiting characteristics of traditional turning due to the application of special kinematic and cutting tool. The alteration of the cutting force and surface roughness is studied in this paper., when the feed is increased. The cutting experiments were carried out with a traditional and a helical edged cutting tool. The maximal values of the cutting force components, their specific values, the Arithmetic mean deviation of the assessed profile and the Average peak to valley height of the profile were analysed. It is concluded, that the passive force and the surface roughness can be lowered effectively by the application of circular feed compared to traditional turning.

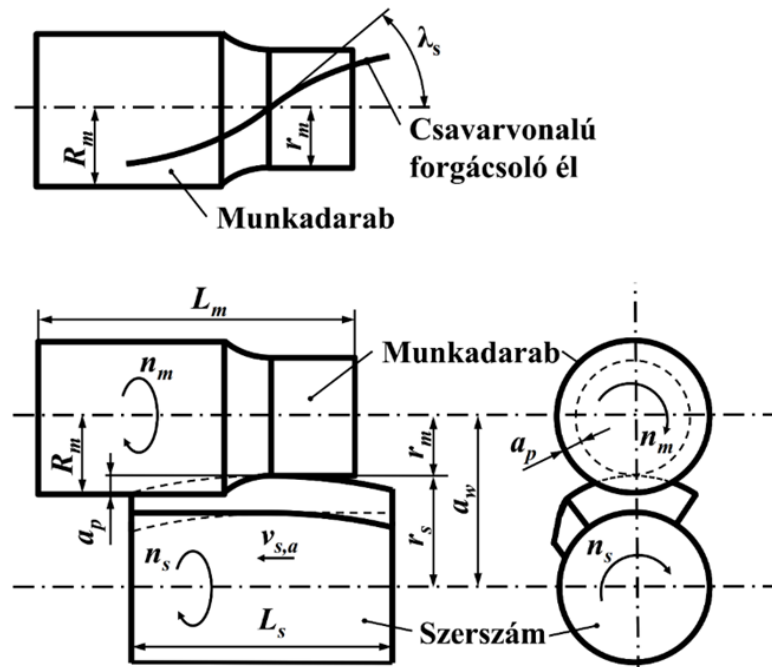
Keywords: circular feed, cutting force, rotational turning, surface roughness

1. Bevezetés

A létrehozott felületek minősége és a megmunkálás hatékonysága függ az alkalmazott forgácsoló eljárástól. Kundra és szerzőtársai furatok befejező megmunkálását vizsgálva megállapították, hogy azonos felületi érdesség érhető el különböző mozgásviszonyokkal is, ugyanakkor a megmunkálási idő jelentősen változhat a választott eljárás függvényében (Molnar et al., 2020). Varga és Ferencsik a köszörülést követő felületvasalás hatását vizsgálva megállapították, hogy habár jobb felületi minőség érhető el, számolni kell a normaidő növekedésével (Varga és Ferencsik, 2019). Qehaja és társai a hűtőkenő folyadék nélküli esztergálási folyamatot vizsgálták (Qehaja et al., 2015), amelynél ők is megmutatták, hogy az előtolás jelentősen befolyásolja a megmunkálás idejét és a megmunkált felület érdességét. Felhő és Varga kutatásában kiemeli (Felho és Varga, 2022), hogy a megmunkált felület várható érdességének számítási pontosságát is befolyásolja az előtolás nagysága: a pontosabb számításokat nagyobb előtolások eredményezték. Különböző anyagminőségű szerszámokat vizsgálva

Niaki és társai megállapították (Niaki et al., 2020), hogy a forgácsoló él stabilitásának mértékétől nagymértékben függ a generált felület minősége. Hagyományostól eltérő megmunkálási módok és szerszámok alkalmazásával foglalkozott Berenji és társai (Berenji et al., 2018), amely munkájukban megállapították, hogy a különböző eljárások alkalmazásával jobb felületi minőség és kedvezőbb hatékonyság érhető el. Továbbá Molnár munkájában is látható, hogy a felület funkcionalitását jellemző topográfiai paraméterek számértéke és változása a különböző technológiai paraméterek függvényében jelentősen eltérhet különböző eljárások esetén (Molnar, 2022). Az alkalmazott mozgásviszonyok és forgácsoló szerszámok élgeometriája jelentősen megváltoztatják a forgácsoló erő és komponenseinek nagyságát és arányát. Az erők vizsgálatánál célszerű a fajlagos forgácsoló erőket is vizsgálni. Karpuschewski és szerzőtársai megmutatták (Karpuschewski et al., 2018), hogy a fajlagos forgácsolóerő csökkentésének egy módja a forgácsarány változtatása nagy előtolás alkalmazásával. Kundrák és társai kísérleti munkájukban megmutatták (Kundrák et al., 2018), hogy az előtolás növelésével az él fajlagos terhelésének csökkenése mellett az erőkomponensek aránya is változik. Denkena és társai szerint (Denkena et al., 2014) a forgácsoló erő összetevői közül a tangenciális irányú erőkomponens lesz a domináns. Tarag és Hwang munkájukban megmutatták (Tarag és Hwang, 1994), hogy a stabil forgácsleválasztás eléréséhez többek között az előtolás növelésével lehet eljutni a fajlagos forgácsolóerő csökkenésével és az eredő erő szögének megváltozásával. Az előbbiekből is látszik, hogy az előtolás nagyságának jelentős szerepe van a forgácsoló erő és komponensei szempontjából.

Rotációs esztergálásnál csavarvonalú geometriájú szerszámot és körelőtolást alkalmazunk (Kummer, 2004), melynek geometriai és kinematikai viszonyait az 1. ábra mutatja ($v_{s,a}$: kiegészítő axiális előtolás; n_s : szerszám szögsebesség; n_m : munkadarab szögsebesség; r_s : csavarvonalú él sugara; r_m : megmunkált felület sugara; λ_s : terelőszög; R_m : megmunkálandó felület sugara; a_p : fogásmélység; a_w : szimmetria tengelyek távolsága, L_m : megmunkált felület hossza).



1. ábra. Körelőtolású esztergálás kinematikai vázlatja (Felho és Varga, 2022).

Ebben a cikkben a rotációs esztergálással végzett megmunkálás során ébredő erőket és a megmunkált felület érdességét vizsgáltam. Az elemzéshez hagyományos esztergálással is elvégeztem a kísérleteket azonos technológiai adatokkal. A forgácsoló erő mérésének eredményei közül a szerszámhoz kötött forgácsolóerő komponensek maximális és fajlagos értékeit vizsgáltam. A felületi érdességet az átlagos érdesség és az átlagos egyenetlenségmagasság értékeinek kiértékelésével elemeztem.

2. Kísérleti feltételek

A kutatómunka célja a forgácsoló erők és a megmunkált felület minőségének vizsgálata rotációs esztergálás esetén. Ezért forgácsolási kísérletek kerültek elvégzésre a forgácsoló erő és a vonalmenti felületi érdesség mérésére és vizsgálatára a körelőtolással végzett forgácsleválasztásnál.

A kísérletek egy Perfect-Jet MCV-M8 típusú megmunkáló központon valósultak meg. A kísérleti próbadarabot a marógép főorsójába fogva biztosítottam a munkadarabnak az esztergálás jellemző forgó mozgását. A forgácsoló szerszám a gépasztalhoz rögzített erőmérő (Kistler 9257A) egységbe került befogásra ER32 patronos befogó segítségével. A szerszám gépasztallal együtt végzett körinterpolációs mozgása biztosította a megmunkáláshoz szükséges körelőtolást. A megmunkált munkadarab nemesített C45 acél anyagminőségű (220 HV), 12 mm hosszú 40 mm átmérőjű hengeres felület. Rotációs forgácsoló szerszámként egy 30°-os (Fraisza P5300682) terelőszöggel (λ_s) rendelkező szerszámot alkalmaztam. A mért értékek összehasonlításához hagyományos esztergáláshoz egy DCLNL 2525 M 12 szárba szerelt CNMG 120412-PM lapkát választottam szerszámként. Ez a forgácsoló szerszám külső hengeres felületek esztergálásához ajánlott, az 1,2 mm-es csúcscradiusz pedig kedvező felületminőséget eredményez. A szerszámgépbe rögzített munkadarabot és rotációs esztergáláshoz használt szerszámot mutatja a 2. ábra.

A kísérleteket 200 m/min forgácsolósebességen (v_c), 0,1 mm fogásmélységgel (a_p) és szerszámonként ötféle előtolással ($f = 0,1$ mm/ford., 0,2 mm/ford., 0,4 mm/ford., 0,6 mm/ford., 0,8 mm/ford.) végeztem el. A tíz kísérleti beállítás paramétereit összefoglalva mutatja az 1. táblázat. Az értékek szakirodalmi ajánlások és korábbi kísérleti tapasztalatok alapján kerültek megadásra.



2. ábra. A főorsóba fogott munkadarab és gépasztalra rögzített szerszám rotációs esztergálás esetén.

1. táblázat. A kutatómunkában vizsgált beállítások főbb adatai

Beállítás	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Eljárás	rotációs esztergálás					hagyományos esztergálás				
Szerszám	Fraisa P5300682					CNMG 120412-PM lapka DCLNL 2525 M 12 szár				
v_c [m/min]	200									
a_p [mm]	0,1									
f [mm/ford.]	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8
λ_s [°]	30					0				

A kísérletek közben a forgácsoló erőt egy, a szerszám és a gépasztal közé beépített, Kistler 9257A háromtengelyes erőmérő egységgel mértem. A berendezés három, egymásra merőleges tengelyirányban rögzítette az adott időpillanatban ébredő erőket. A piezoelektromos elven működő erőmérő három kimeneti jelét 1-1 Kistler 5011 töltéserősítő alakítja át feszültségértékké, melyeket a National Instruments által gyártott cDAQ-9171 házú NI-9215 adatgyűjtő egység mér és közvetít az adatgyűjtő számítógép felé. A megmunkált felületeken három egymástól 120° távolságra lévő alkotók mentén vonalmenti érdességmérést végeztem egy Mitutoyo SurfTest SJ-301 2D-s mérőberendezéssel. A mérési hossz és a határhullámhossz a DIN EN ISO 4288 szabvány szerint kerültek kiválasztásra.

3. Kísérleti eredmények

Az erőmérő rendszer 1000 Hz mintavételezési frekvencián rögzítette az X, Y és Z irányú erőket. A mért értékek és a munkadarab-szerszám pillanatnyi helyzetéből kiszámoltam a szerszámhoz kötött koordináta-rendszerben a főforgácsoló (F_c), passzív (F_p) és előtölés irányú (F_f) erőket. Az erődiagramok maximális értékeit meghatároztam (2. táblázat). Az érdességmérés eredményei közül az átlagos érdesség (R_a) és az átlagos egyenetlenségmagasság (R_z) értékeit vizsgáltam. A tíz beállítás 3-3 mérési eredményei, valamint átlaguk a 3. táblázatban látható.

2. táblázat. Az erőkomponensek maximális értékei

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
F_c [N]	51,63	82,5	136,49	180,23	204,3	55,56	82,13	130,09	178,06	230,9
F_f [N]	33,17	49,97	74,83	96,29	102,17	73,6	93,6	130,82	171,8	212,16
F_p [N]	13,52	21,28	38,62	53,15	59,51	11,61	8,25	17,84	24,29	25,01

3. táblázat. Az érdességmérés vizsgált paramétereinek mérési eredményei

$R_{a,1}$ [μm]	0,47	0,47	0,54	0,73	1,20	0,49	0,96	3,36	6,68	10,66
$R_{a,2}$ [μm]	0,45	0,48	0,55	0,69	1,39	0,49	0,99	3,27	6,49	10,78
$R_{a,3}$ [μm]	0,48	0,49	0,57	0,74	1,28	0,48	0,94	3,27	6,57	10,53
$R_{a,\acute{a}}$ [μm]	0,466	0,48	0,553	0,72	1,29	0,486	0,963	3,3	6,58	10,656
$R_{z,1}$ [μm]	3,22	3,82	3,58	5,18	7,42	2,01	4,44	13,52	25,74	40,37
$R_{z,2}$ [μm]	2,83	3,79	3,54	5,19	7,16	1,91	5	13,44	25,54	40,15
$R_{z,3}$ [μm]	3,05	3,73	3,45	5,67	7,24	1,76	4,46	13,35	25,67	40,52
$R_{z,\acute{a}}$ [μm]	3,033	3,78	3,523	5,346	7,273	1,893	4,633	13,436	25,65	40,346

4. táblázat. A forgácsoló erő fajlagos értékei

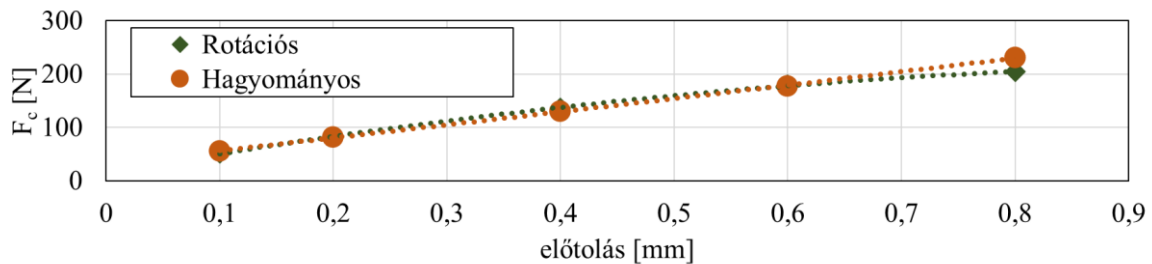
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
k_c [N/mm ²]	5163	4125	3412	3004	2554	5556	4106	3252	2968	2886
k_f [N/mm ²]	3317	2499	1871	1605	1277	7360	4680	3271	2863	2652
k_p [N/mm ²]	1352	1064	966	886	744	1161	412	446	405	313

A 2. táblázat erő értékeiből meghatároztam a fajlagos forgácsoló erő (k_i) értékét F_c , F_p és F_f erőkre az 1. egyenlet szerint. Ezzel a paraméterrel az egységnyi forgács-keresztmetszetre (A_c) ható terhelés jellemezhető. A számítás eredményeit a 3. táblázat mutatja.

$$F_i = k_i \cdot A_c \rightarrow k_i = F_i / A_c \quad (i = c, p, f ; A_c = a_p \cdot f) \quad (1)$$

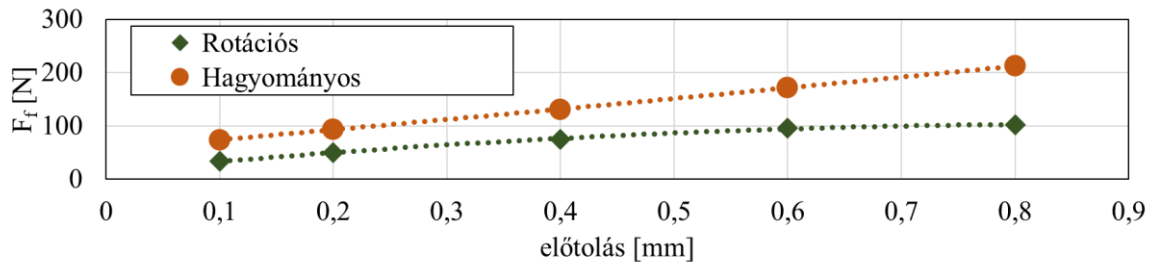
4. Kiértékelés

A kísérleti eredmények közül a forgácsoló erőkomponensek maximális értékeit mutatják a 3-5. ábrák. A különböző előtolásokon végzett kísérleteknél a főforgácsoló erő (F_c) volt a legnagyobb, melyet a passzív erő (F_p) és az előtolásirányú erő (F_f) követett. Kis (0,1-0,4 mm/ford.) előtolásokon a passzív erő közel 60%-a, az előtolás irányú erő közel 25%-a a főforgácsoló erőnek. 0,4-0,8 mm/ford. előtolásokon megfigyelhető, hogy az F_p közel 50%-a, az F_f közel 30%-a az F_c erőnek. Vagyis megállapítható, hogy ez előtolás növelésével megváltozik a forgácsoló erő komponenseinek nagysága és így a főforgácsoló erő iránya is.



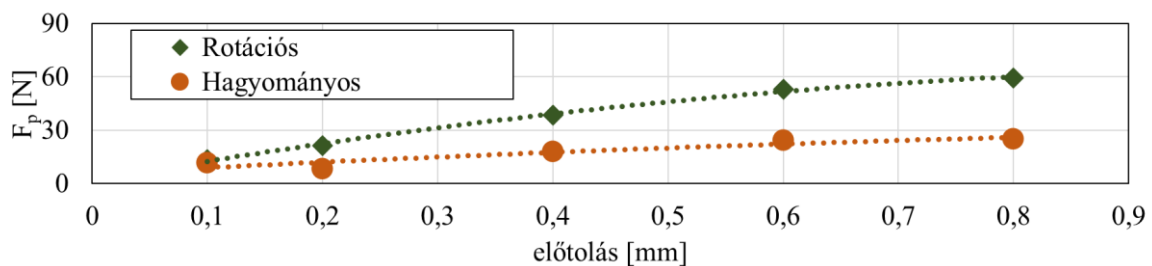
3. ábra. A főforgácsolóerő maximális értékei az előtolás függvényében.

A főforgácsoló erőt (F_c) vizsgálva (3. ábra) megállapítható, hogy mindkét szerszámnál közel azonos értékek adódtak. A különböző előtolásoknál végzett kísérletek azt mutatják, hogy az előtolás növelés mértékétől kisebb arányban nő ez az erőkomponens (az előtolás kétszeresére növelésekor ~1,6-szeresére nő a főforgácsoló erő).



4. ábra. Az előtolás irányú erő maximális értékei az előtolás függvényében.

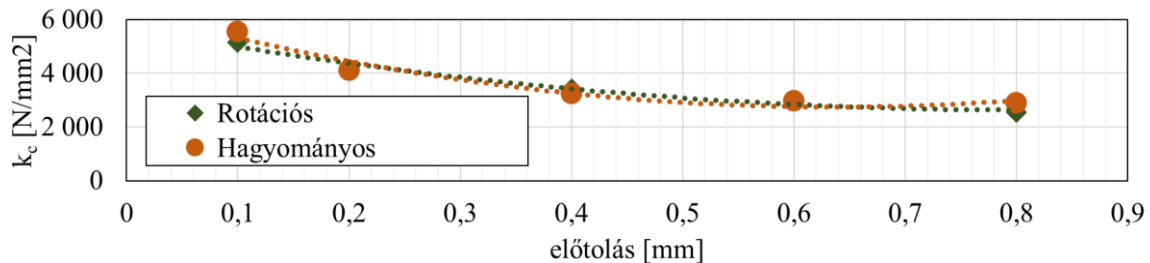
A 4. ábrán az előtolásirányú erő (F_f) változása látható. Rotációs esztergálás esetén a terelőszög változása alapján megállapítható, az előtolás kétszeresése közel 1,7-szeres növekedést eredményez az F_f erőkomponensben. A hagyományos esztergakésnél mértem a legkisebb erőket: azonos előtoláson a rotációs esztergálás esetén az előtolás irányú erő közel kétszerese a hagyományos esztergáláshoz képest.



5. ábra. A passzív erő maximális értékei az előtolás függvényében.

A passzív irányú erő (F_p) esetében (5. ábra) megállapítom, hogy a körelőtolású eljárásnál a passzív erő 45-57 %-a lesz a hagyományos hosszesztergálásnál mért értékeknek. Változatlan F_p erő mellett rotációs esztergálás esetén 4-szer akkora előtolás állítható be a hagyományos esztergáláshoz képest, illetve változatlan előtolás mellett fele akkora passzív erővel számolhatunk a rotációs esztergálásra

áttéréskor. A passzív erő nagyságának kiemelt jelentősége van, mivel jelentősen befolyásolhatja a gyártott alkatrészek pontosságát.

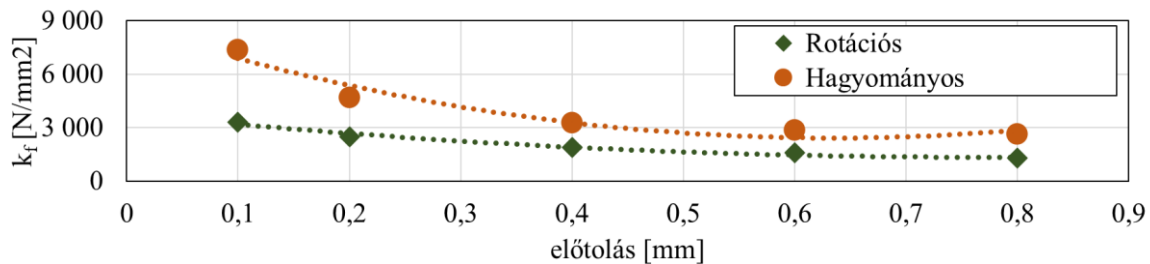


6. ábra. A fajlagos főforgácsolóerő értékei az előtolás függvényében.

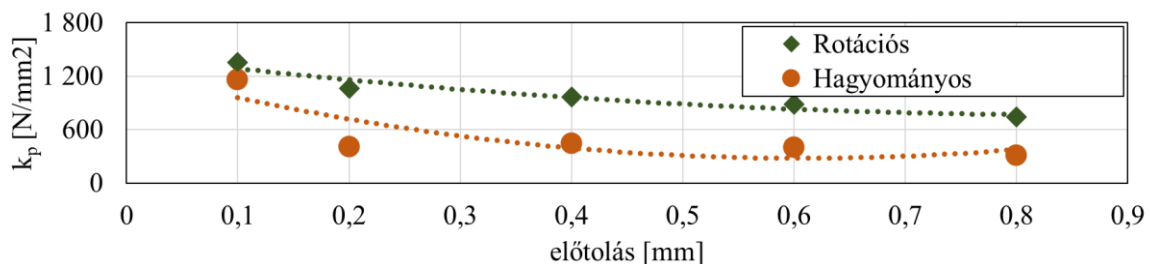
A fajlagos főforgácsolóerő értékét vizsgálva (6. ábra) megállapítható, hogy a két szerszám esetén közel azonos értéket kaptam az egyes előtolásokon. Az előtolás növelésével az egységnyi keresztmetszetre jutó terhelés folyamatosan csökken a forgácsvastagság növekedése miatt. Ez a csökkenés 0,6 mm/ford.-tól kisebb előtolás esetén nagyobb mértékű, mint 0,6 mm/ford.-tól nagyobb előtolás esetén.

A 7. ábrán a passzív erő fajlagos értékei láthatók, melyek a k_c -hez hasonlóan az előtolás növelésével csökkennek. A passzív erő esetén 0,4 mm/ford. előtolástól válik közel állandóvá a fajlagos érték. Minden előtoláson a hagyományos esztergácsolószerszámmal végzett megmunkálásnál közel kétszer akkora fajlagos terhelést kaptam, mint a csavarvonal élű szerszámmal. Vagyis a rotációs esztergálás alkalmazásával csökkenthető az alakhiba értéke.

Az fajlagos előtolás irányú erő esetén (8. ábra) a legkisebb értékeket a hagyományos szerszámmal, a legnagyobb értékeket rotációs szerszámmal végzett megmunkálás eredményezte. A k_f 0,2 mm/ford. előtolástól válik közel azonos értékűvé.

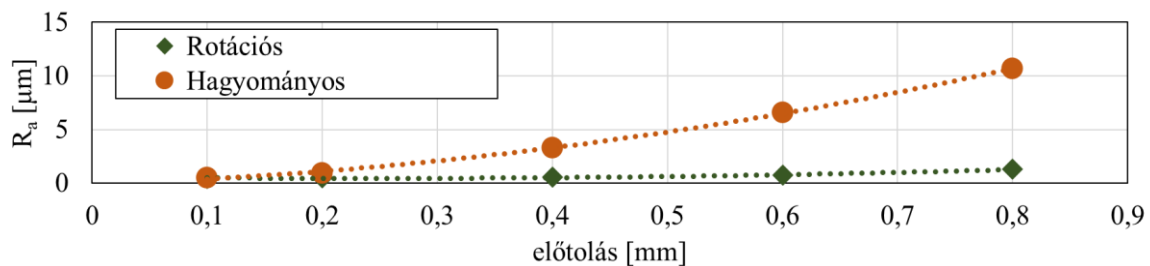


7. ábra. A fajlagos előtolás irányú erő értékei az előtolás függvényében.

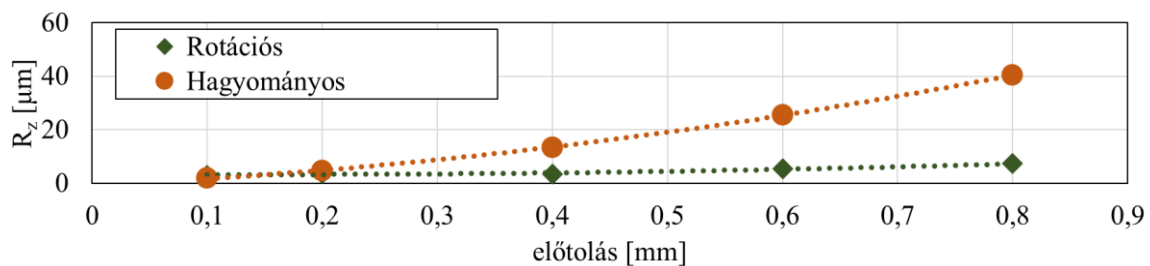


8. ábra. A fajlagos passzív erő értékei az előtolás függvényében.

Az érdességmérés kiértékelésének eredményeit mutatják a 9-10. ábrák. A csavarvonalú éllel rendelkező szerszám esetében kismértékben növekednek az R_a és R_z értékek. 0,4 mm/ford. előtolás alatt a növekedés majdnem elhanyagolható, ugyanakkor az előtolás 0,4 mm/ford.-ról 0,8 mm/ford.-ra növelése majdnem kétszeres növekedést eredményez. A hagyományos esztergaszerszámmal végzett megmunkálást követően közel állandó felületi érdességet mértem 0,1 mm/ford. és 0,2 mm/ford. esetén. Az értékek növekedése itt 0,2 mm/ford. értéktől bekövetkezett, amely ponttól a felületi érdesség paraméterei exponenciális mértékben növekedtek (0,2 mm/ford.-os előtolás növekedés közel kétszeres növekedést okozott R_a és R_z értékeiben).



9. ábra. Az átlagos érdesség az előtolás függvényében.



10. ábra. Az átlagos egyenetlenségmagasság az előtolás függvényében.

A különböző szerszámokkal végzett megmunkálások összehasonlítása alapján a következő konklúziók vonhatóak le. 0,1 mm/ford. előtolással végzett megmunkálás közel azonos R_a értékeket eredményezett, ugyanakkor R_z értéke 1,5-szer nagyobb lett rotációs esztergálást követően. Ezt az eredményezte, hogy kis előtolással való megmunkálás esetén a forgácsolt felület érdességét nem a szerszámgeometria befolyásolja elsősorban, hanem az anyagban bekövetkező másodlagos deformációk, szövetszerkezet stb. Ugyanakkor a forgácsoló szerszámokkal elért érdességi értékek sorrendje megfordul 0,2 mm/ford. előtolástól. Innentől a forgácsoló él geometriája egyre meghatározóbb szerepet tölt be a megmunkált felület topográfiájának kialakulásában.

5. Összefoglalás

Az elvégzett kísérletekben az előtolás hatását vizsgáltam a forgácsolóerőre és a felületi érdességre hagyományos és rotációs esztergáló eljárások esetén. Eljárásonként egy-egy szerszámmal ötféle előtolással hajtottam végre a kísérleteket.

A szerszámra ható erőkomponensek maximális és fajlagos értékeit kiszámolva a következőket állapítottam meg. A fajlagos főforgácsolóerő közel azonos a rotációs és a hagyományos esztergálás esetén. Ugyanakkor a fajlagos passzív erő jelentősen kisebb rotációs eljárásnál (közel fele), az

előtolásirányú erő esetében nagyobb értékeket kaptam (2-4-szeres növekedés) a hagyományos esztergáláshoz képest. Eszerint ugyanakkora forgácsolási teljesítményszükséglet mellett kisebb lesz a munkadarabot szerszámtól eltolni igyekvő erő, viszont nagyobb lesz a szerszámtartót tengelyirányban terhelő erő. Vagyis rotációs esztergálás alkalmazásakor a munkadarab kihajlásától függő hibák csökkenésére lehet számítani, hiszen a megmunkáló rendszer kihajlása várhatóan kisebb lesz. A szerszámtartó méretezésekor figyelembe kell venni a megváltozott irányú terhelést.

A mért R_a és R_z értékek átlagértékeiből arra következtethetünk, hogy a rotációs esztergálás alkalmazása lényegesen kisebb felületi érdességet eredményez, mint a hagyományos esztergálással megmunkált felületek. 0,4-0,8 mm/ford. előtolásokon a körelőtolású esztergálás eredményezte a kisebb érdességet. Megfigyelhető továbbá, hogy a hagyományos esztergálással generált érdesség eléréséhez 2-3-szor nagyobb előtolás állítható be rotációs esztergálás esetén. Ebből következik, hogy a rotációs esztergálással végzett befejező megmunkálás termelékenyebb, mivel ugyanazon időtartam alatt több felület képes megmunkálni ugyanolyan felületi érdességgel, mint a hagyományos esztergálás.

Irodalom

- [1] Molnar, V., Deszpoth, I., Kundrak, J., Markopoulos, A. P. (2020). Efficiency of material removal and machining in cutting. *Rezanie I Instrumenty V Tekhnologicheskikh Sistemah*, 92, 35–47. <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2020.92.05>
- [2] Varga, G., Ferencsik, V. (2019). Examination of 3D surface topography of diamond burnished C45 workpieces. *Rezanie I Instrumenty V Tekhnologicheskikh Sistemah*, 90(1), 153–162. <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2019.90.16>
- [3] Qehaja, N., Jakupi, K., Bunjaku, A., Bruçi, M., Osmani, H. (2015). Effect of machining parameters and machining time on surface roughness in dry turning process. *Procedia Engineering*, 100, 135–140. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.351>
- [4] Felho, Cs., Varga, Gy. (2022). Theoretical roughness modeling of hard turned surfaces considering tool wear. *Machines*, 10(3), 188. <https://doi.org/10.3390/machines10030188>
- [5] Niaki, F. A., Haines, E., Dreussi, R., Weyer, G. (2020). Machinability and surface integrity characterization in hard turning of AISI 4320 bearing steel using different CBN inserts. *Procedia Manufacturing*, 48, 598–605. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.05.087>
- [6] Berenji, K. R., Kara, M. E., Budak, E. (2018). Investigating high productivity conditions for turn-milling in comparison to conventional turning. *Procedia CIRP*, 77, 259–262. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.09.010>
- [7] Molnar, V. (2022). Tribological properties and 3D topographic parameters of hard turned and ground surfaces. *Materials*, 15(7), 2505. <https://doi.org/10.3390/ma15072505>
- [8] Karpuschewski, B., Kundrák, J., Varga, Gy., Deszpoth, I., Borysenko, D. (2018). Determination of specific cutting force components and exponents when applying high feed rates. *Procedia CIRP*, 77, 30–33. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.199>
- [9] Kundrák, J., Markopoulos, A. P., Makkai, T., Deszpoth, I., Nagy, A. (2018). Analysis of the effect off on chip size ratio and cutting forces in face milling for various cutting speeds. *Manufacturing Technology*, 18, 431–438. <https://doi.org/10.21062/ujep/117.2018/a/1213-2489/MT/18/3/431>
- [10] Denkena, B., Vehmeyer, J., Niederwestberg, D., Maaß, P. (2014). Identification of the specific cutting force for geometrically defined cutting edges and varying cutting conditions. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 82–83, 42–49. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.03.009>

- [11] Tarag, Y. S., Hwang, T. S. (1994). An investigation of the specific cutting force and its direction factors in turning. *Computers & Structures*, 53(4), 937–945.
[https://doi.org/10.1016/0045-7949\(94\)90381-6](https://doi.org/10.1016/0045-7949(94)90381-6)
- [12] Kummer, N. (2004). *Method and device for machining rotationally symmetrical surfaces of a workpiece*. Szabadalom száma: DE102004026675C5.