

# SZERSZÁMGEOMETRIA HATÁSA A TROCHOIDÁLIS MARÁS EREDMÉNYESSÉGÉRE

Szalóki István<sup>1</sup> - dr. Sipos Sándor<sup>2</sup>

<sup>1</sup> tanársegéd, ÓE-BGK

<sup>2</sup> címzetes egyetemi docens, mestertanár, ÓE-BGK

**Absztrakt:** A hőálló szuperötvözetek (HRSA) anyagcsoportot a nagy szilárdság és keménység (még 1000°C közelében is), valamint a jó korrózióállóság jellemzi. Az általunk vizsgált hőálló, nikkelbázisú szuperötvözet (GTD-262) hővezető képessége alacsony, emellett - a jelentős Ni-, Cr- és Ti tartalom miatt - a forgácsolósebesség növelésével rendkívüli mértékben képes felkeményedni. Ez a forgácsolhatóságot nagyon kedvezőtlenül befolyásolja és a termelékeny megmunkálást akadályozza. A forgácsolási alakváltozásból és súrlódásokból keletkező nagy hőenergiát csak kis mértékben vezeti el a forgács, annak túlnyomó része a forgácsolási zónában marad és főként a marószerszámot terheli, igen magas hőmérsékletet generálva. Az élen kialakuló nagy lokális hőterhelés csökkentésére és a folyamatbiztonság fokozására olyan innovatív marási módszert kell alkalmazni, amely a szerszám radiális és axiális terhelésének csökkentésével kedvezőbbé teszi a forgácsolás folyamatát. A szerszámélek fogásból történő fokozatos kilépése elősegíti az aktív hűlési folyamatot. Mindezekre a trochoidális marás jelent megoldást. Jelen cikkünk a szuperötvözetben megmunkált egyenes hornyok cikloispályás trochoidális marásáról, annak a leginkább alkalmas technológiai- és szerszámgeometria változatairól, illetve az elért nagymértékű folyamatbiztonság- és szerszáméltartam-növekedésről számol be.

**Kulcsszavak:** Cikloispályás trochoidális marás, csökkenő élterhelés, növelt folyamatbiztonság és termelékenység, kedvező szerszáméltartam

## 1 Bevezetés

Kutatásaink alapja a GE Hungary Kft. veresegyházi telephelyén jelentkező megmunkálási feladat gazdaságosabb megoldása. A megmunkálás nehézségét a gyárban elsősorban a turbinalapátok anyagminősége (hőálló szuperötvözet), illetve a megmunkálási folyamat horonymarási művelete jelenti. Az alkalmazott eljárás a hagyományos, ún. telibemarás, amelyet a horonyszélességgel csaknem megegyező átmérőjű szerszámmal végeznek, ráadásul a maró kinyúlását és a horony mélységét is a feladat határozza meg. Ez a megoldás a következő hátrányokkal jár:

- a szerszám nagy dolgozó élszakasza van fogásban, a kapcsolódási hossz a szerszám fél kerülete, a szöge pedig  $180^\circ$ ;
- a nagy mélységű hornyok ezzel a módszerrel - a jelentős forgácsoló erők és a fokozódó rezgésveszély miatt - csak több lépésben munkálthatók meg, ami a termelékenység fokozott csökkenésével jár;
- a nehezen forgácsolható anyag miatt nagy a forgácsolóerő és a szerszám hőmérséklete;
- a pillanatnyi forgácsvastagság folyamatosan változik, ezért ingadozó a szerszám terhelése;
- beszoruló forgács „újravgácsolódik”, ezek okozzák az erősen kicsorbult szerszáméleket.

A fentiek hatása nem csak az erőhatásokban, a szerszámok éltartamában, hanem a folyamatbiztonság és a termelékenység kedvezőtlen alakulásában is megjelenik. Sok kísérletre támaszkodó megállapításunk az, hogy az igen kedvezőtlenül forgácsolható szuperötvözetek horonymarásának egyedüli és valóban hatékony módszere a különleges szerszám pályák alkalmazása. Ezen témakörben több publikációnk is megjelent [1 - 6], amelyek lényegi ismertetésétől – terjedelmi okok miatt – itt el kell tekintenünk.

Jelen tanulmányunk az előírt geometriájú és méretű hornyok trochoidális marással végzett megmunkálás eredményeiről számol be, rávilágítva a technológiában rejlő jelentős felhasználói előnyökre.

## 2 Cikloispályás trochoidális marás bemutatása

A trochoidális marás (továbbiakban: TM) a nagyteljesítményű forgácsolás (High Performance Machining, HPM) változatai közé sorolható. A HPM-eljárás a teljes forgácsolási folyamat optimalizálására épülő módszer, fő célkitűzése a legnagyobb termelékenység elérése – emellett fontos szerep jut a minőség biztosításának is. A HPM-eljárás trochoidális marásra vonatkozó legfontosabb feltétele a megfelelő gyorsaságú gépkínematika, amely „késelem nélkül” képes lekövetni összetett mozgásciklusokat. Fontos követelmény még a korszerű, gyors, előrettekintő vezérlés, mindezt rugalmas programozhatóság egészítik ki.

A TM a palástmarás egyik változatának tekinthető. Az eljárással elsősorban nyomatékátvivő felületeket, zsebeket, szigeteket lehet megmunkálni. A technológia sajátossága, hogy adott „ $D_c$ ” átmérőjű szerszámmal elkészíthető horony szélessége ( $b_w$ ) minimum  $1,15 \times D_c$  nagyságú. A horony hosszirányú kiterjedése mentén szerszámközéppont előrehaladását radiális ellépésnek ( $w$  - step over) nevezik, mérete

$(0,02-0,1) \times D_c$  körül alakul. A horony egyetlen lépésben mart mélysége ( $h_w = a_p$ ) pedig elérheti akár a  $(3-4) \times D_c$  értéket is. A szerszám radiális fogásvétele ( $a_e$ ) kisebb a megszokottnál és nagysága folyamatosan változik a pálya mentén, ennek pontos ismerete és kontrollálása elengedhetetlen a megfelelő folyamatbiztonság érdekében. A szerszám pálya tervezése során konstans a radiális ellépés ( $w$ ), ennek megadott nagyságát mindig meghaladja a legnagyobb radiális érintkezéshez tartozó  $a_{e_{max}}$  értéke, bizonyos körülmények között annak akár többszöröse is lehet. A maximális fogásszélességet a horonyszélesség és az ellépés mértéke határozza meg [5, 6].

Jelen kutatási fázisban egyenes hornyokat munkáltunk meg, amelyeket ún. cikloisképző marópályával gyártottunk. Ezen görbe paraméteres (1) egyenlete a szerszám pálya pontjait adja meg a mart síkon:

$$x_{kp} = r_p \cdot \sin\theta + \frac{w \cdot \theta}{2} \cdot \pi, \quad y_{kp} = r_p \cdot \cos\theta \quad (1)$$

ahol:

$x_{kp}, y_{kp}$  : a szerszám középpontjainak koordinátái, mm;

$r_p$  : a gyártandó horonyszélességtől és szerszámátmérőtől függő ún. pályarádiusz, mm;

$w$  : a horonyközépen értelmezett ciklusonkénti ellépés, mm;

$\theta$  : a planetáris forgatás szögértéke, ° [7].

A ciklois marópálya szabatos definiálásának legfontosabb eleme az előtolás irányú hibát meghatározó húr hosszúság ( $t$ ). Ez egy olyan pontossági tényező, amely a pályát leíró pontok sűrűségét (egymástól való távolságát) határozza meg. A vizsgálatokat (a számítógéppel segített gyártás gyakorlatában megszokott)  $3 \mu\text{m}$  hibával végeztük el, ekkor a  $t \approx 0,34$  mm-re adódott.

Egyenes hornyok cikloisképző trochoidális marásakor a szerszám kapcsolódási szöge kicsiny (a megmunkált anyag minőségétől függően  $10-70^\circ$  közötti), ezért a maró radiális terhelése kedvező. Ennek következtében – a hagyományos, telibemaráshoz képest – a TM-eljárás használatakor jóval nagyobb forgácsolósebesség és fogankénti előtolás alkalmazható, ami nagyban fokozza a termelékenységet. Ez az előny főként nagy mélységű ( $[h_w/b_w] \gg 1$ ) hornyok megmunkálásakor használható ki, hiszen – a kis szerszámterhelésnek köszönhetően – jóval nagyobb fogásmélység is alkalmazható, ezáltal a horony kevesebb fogásból (azaz termelékenyebben) munkálható készre.

A trochoidális marás legfontosabb sajátosságai:

- csak egyenirányú marást valósít meg;

- alacsony hőterhelés a szerszámmélen;
- gyakorlatilag sorjamentes megmunkálás még a sorjaképződésre hajlamos anyagokban is;
- kicsiny erőterhelés (viszont fokozódó rezgésveszély);
- nincs szerszámkihúzóadás (vagy csak igen kismértékű);
- esetleges törés esetén nem marad szerszámnyom a horonyfenéken, ezzel a költséges és időigényes utólagos alkatrészjavítás (esetleg selejt) kiküszöbölhető;
- ritka a szerszámtörés: tapasztalataink szerint stabil magméretekkel rendelkező keményfém szerszám a túlkopási állapotához igen közel sem törik el;
- többszörösére növekszik a szerszám éltartama (még az ilyen extrém nehezen forgácsolható anyagoknál is);
- mindemellett a marási folyamat termékenysége közel azonos a telibemarással;
- az egységnyi idő alatt leválasztott forgácstérfogat többszörösére növekszik [1];
- egyetlen hátránya: a ciklois mozgáspálya forgácsoló és üresjárat (holtidő) szakaszból áll. Az üresjárat szakasz az, amikor a ciklois görbe mentén a szerszám kilép a fogásból és halad a fogásba lépés felé.

A termelékenység további növelése érdekében olyan paraméteres programozást alkalmaztunk, amely a ciklois görbe üresjárat szakaszán növelt eltolósebességet valósít meg, így a forgácsolásmentes részt gyorsabban bejárja a maró.

### 3 A kísérletek anyag- és szerszámoldali körülményei

#### 3.1 Célkitűzések

Kutatásunk elsődleges célja, hogy a nikkelbázisú szuperötvözet (GTD-262) trochoidális maráshoz leginkább ideális szerszámgeometriát és a technológiai körülmények közötti összefüggéseket online erő- és kopásméréssel mutassuk ki. Az alapanyag publikus szilárdsági paramétereit az 1. táblázat foglalja össze.

1. táblázat GTD-262 szilárdságtani jellemzői

	szobahőmérsékleten	760°C-on	900°C-on
$R_{eh}$ , MPa	690	550	170 MPa terhelés hatására 25 óra alatt max. 5%-os kúszás megengedett
$R_m$ , MPa	890	690	
HRC	max. 40		

ahol:  $R_{eh}$  - folyáshatár minimum;  $R_m$  - szakítószilárdság minimum;  
HRC – Rockwell keménység

### 3.2 Körülmények

A marási tesztek az Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Karának műhelyében található Mazak Nexus 410A-II megmunkálóközponton ( $P_{\text{motor}}=11$  kW;  $n_{\text{főorsó}}=12000$  1/min) végeztük. A munkadarabot precíziós gépsatuba rögzítettük, amelyet a gépasztalra felszerelt, 3 erőkomponenst mérő (Kistler 9257B típusú) erőmérőpadra szereltünk.

A kísérleteket az üzemből származó, rögzített horonyméretekkel hajtottuk végre: a szélesség ( $b_w$ ) 9,7 mm, a mélység ( $h_w$ ) 13 mm és a horonyhossz ( $l_w$ ) 40 mm volt. A műveletet 25 mm minimális szerszámkinyúlással ( $l_k$ ) kellett végrehajtani.

A fenti geometriájú horony általánosan alkalmazott hagyományos megmunkálási stratégiájának első lépése a nagyoló telibemarással, majd ezt követi a horony oldalfalainak simítása (a megadott tűrés elérése érdekében). A nagyolás során a horony szélességénél csak alig kisebb átmérőjű szerszámot használnak, de a megmunkálás szerszám pályája mindvégig egyenes menti. Ez sajnos számos esetben nem vezet eredményre, ezért a hornyokat trochoidális marással munkáltuk meg. A vizsgálat eredményeit az alábbiakban részletesen ismertetjük.

### 3.3 A kutatáshoz felhasznált szerszámok

A vizsgálatok elvégzésére 8 különböző gyártó Ø6 mm átmérőjű, 4-élű szerszámait alkalmaztuk. A marók részletes adatait a 2. táblázatban foglaltuk össze. Látható, hogy egyes gyártó cégek több szerszám típust is rendelkezésünkre bocsátottak, így összesen 11-féle szármarót tesztelhettünk. Titoktartási kötelezettségünknek eleget téve a marókat azonosító jellel (#1...#11) láttuk el. A szerszámok csoportosítását a horonyemelkedési szög alapján végeztük, a mérési eredményeket összesítő diagramok könnyebb átláthatósága miatt az egyes marókat a fenti azonosítójuk jellemzi.

2. táblázat Kutatási marószerszámok geometriai sajátosságai

Jel.	Bev.	Élv	$L_m$	$a_{pm}$	$\lambda$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
#1	AlTiN	R0,38-0,51	57	13	35	13.5	66.2	10.3
#2	AlTiN	-	57	13	35	13.5	66.2	10.3
#3	AlTiN	-	57	13	35	5.2	74.8	10.1
#4	TiAlN	R0,1	57	13	35	13.2	62.3	14.5
#5	TiAlN	0,15x45°	57	13	35-38	10.0	71.2	8.9
#6	TiAlN	0,12x45°	57	18	38-42	7.3	77.3	5.4
#7	polychrome	0,15x45°	57	13	40	12.1	76.0	1.9
#8	polychrome	R0,51	57	25	40	10.6	78.1	1.3
#9	AlCrN	R0,2	50	13	38-41	11.3	71.8	7.0
#10	TiAlN	-	57	13	45	11.0	71.0	8.0
#11	AlCrN	R0,5	65	23	45	12.2	48.9	28.9

A táblázat fejlécében a következő jelölések láthatók: Bev. – bevonat; Élv – élvédelem, mm;  $L_m$  – maximális szerszámhossz, mm;  $a_{pm}$  – maximálisan alkalmazható fogásmélység, mm;  $\lambda$  – spirálemelkedés szöge, °;  $\alpha$  – hátszög, °;  $\beta$  – ékszög, °;  $\gamma$  – homlokszög, °. Megjegyezzük, hogy a #6 jelzésű maró belső hűtőcsatornás konstrukciójú.

A szerszámokat minden esetben EMUGE-FRANKEN SK40 hidegzugoros befogóban rögzítettük. A befogóegység állítható ütközője segítségével a szerszámkinyúlás állandó értéken tartható. A szerszámok ütését minden befogás alkalmával a szerszámgép főorsójába rögzített állapotban mértük, ezek értéke az összes maró esetében nem haladta meg a 8  $\mu$ m-t.

A forgácsleválasztást megelőzően minden szerszámról új állapotban 7-szeres, majd az esetleges gyártási hibák és geometriai jellegzetességek megállapításához még nagyobb felbontású felvételeket készítettünk a CCD-kamerával felszerelt, 45-szörös nagyítású sztereomikroszkóppal. A képelemzést Image Pro Insight<sup>TM</sup> képkiértékelő szoftverrel hajtottuk végre. Minden sikeres (azaz szerszámtörés nélküli) horonymarás végén a szerszám éleinek elhasználódásáról 30-szoros nagyítású felvételek készültek, a kritikus részleteket még nagyobb, 45-szörös felbontásban elemeztük. A kísérletek során kizárólag a hátkopást (VB) vizsgáltuk,  $\pm 0,01$  mm pontossággal, az elhasználódás

megengedett határértékét (az üzemi tapasztalatok alapján)  $V_B=0,2$  mm-ben határoztuk meg. Ilyen mértékű hátkopást azonban a vizsgálatok egyike során sem mértünk, még szerszámtöréskor (!) sem.

Az axiális fogásmélységet egységesen  $a_p=12$  mm-re választottuk annak érdekében, hogy valamennyi tesztszerszámot meg tudjuk vizsgálni (bár az előírt horonymélységtől így kis mértékben eltértünk). Azóta már bebizonyítottuk, hogy a módszer – megfelelően tervezett és gyártott dolgozó élhosszúságú maróknál – hasonló eredményességgel alkalmazható akár még 15 mm mélységben is.

A horonyhosszt 40 mm-re állítottuk be, mert az ipari igény is ezzel volt azonos. Anyagtakarékossági okokból a vizsgálatokat többször a már elkészült horonyba visszaállva folytattuk. A rezgések elkerülése érdekében a kész hornyok között minimum 4 mm anyagvastagságú falat hagytunk.

A méréseknél árasztásos hűtés-öblítés-kenést alkalmaztunk (Aquamet 40, 6-8%-os emulziója, hozam:  $\sim 30$  l/min). A #6 jelzésű maró kettős (külső és belső) hűtéssel üzemelt.

A marási teszteknel egységesen a fentebb leírt ciklois marópálya modellt alkalmaztunk, illetve a 3. táblázatban megadott forgácsolási adatokat állítottuk be. Ezen technológiai beállításokat többéves kutatómunkánk [1, 2, 3] eredményei szolgáltatták.

3. táblázat Trochoidális marás alkalmazott forgácsolási paraméterei

Forgácsolósebesség, $v_c$ , m/min	32
Fogankénti előtolás, $f_z$ , mm	$>0,145$
<b>Átlagos forgácsvastagság, <math>h_{\text{átl}}</math>, mm</b>	<b>0,05</b>
Pályaellépés, $w$ , mm	0,40
Max. radiális szerszámterhelés, $a_{\text{cmax}}$ , mm	1,06

A szerszámok bemérési adatait figyelembe véve a megengedhető fogankénti előtolás értékét a spirálemelkedési szög függvényében állítottuk be. Ez azt jelenti, hogy az állandó értékű átlagos forgácsvastagság nagyobb horonyszöghöz nagyobb fogankénti előtolást rendel (3. táblázat). Az átlagos forgácsvastagság megfelelő értékét (esetünkben  $h_{\text{átl}}=0,05$  mm) a szerszámok geometriai adatainak (külső- és magátmérőjének, ékszögének stb.) ismeretében úgy határoztuk meg, hogy a rendelkezésre álló horonytér fogat kitöltési tényezője semmiképp se haladja meg a 60%-os mértéket. A marók félig zárt forgácstere így még biztosítja a megfelelő forgácstárolást és hozzájárul a forgács elvezetéséhez is.

4. táblázat A spirálszögekhez rendelt fogankénti előtolások,  $h_{\text{átl}} = 0,05$  mm

Spirálszög, °	35	40	45
Fogankénti előtolás, mm	0,145	0,156	0,169

## 4 A vizsgálati eredmények bemutatása

### 4.1 A végrehajtott trochoidális marási kísérletek eredményei

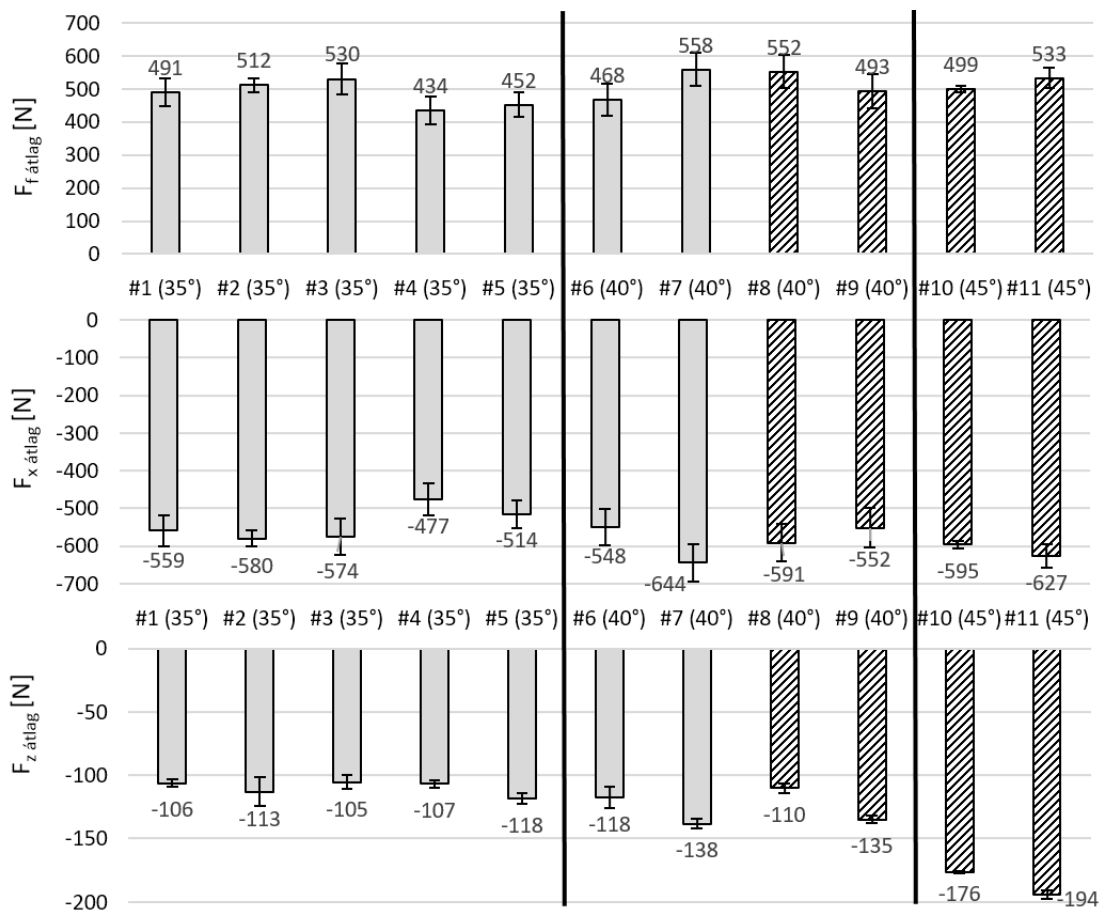
Az erőmérés minden szerszám esetében rövid marási úthosszakra (40 mm) vonatkozott. A teljes megmunkálás idejéből 5 mintavételezési pontot választottunk ki, amelyek számtani sort alkottak. Az első pontnak a fogásba lépést követően a 15. másodperchez tartozót, az utolsónak pedig a kilépést megelőzőt jelöltük ki. A kiértékeléshez továbbá felhasználtuk azt a ciklust is, ahol a mérés során a maximális erő ébredt. A kísérleti adatok elemzésekor a kiválasztott pontokban az  $F_f$ ,  $F_x$ ,  $F_z$  átlagértékeit, valamint a maximális  $F_f$ , illetve a minimális  $F_x$ ,  $F_z$  adatát vettük számításba. A tesztelt marók közötti különbségek kimutatásához a vizsgált pontokban mért átlagerők átlagát használtuk fel és hasonlítottuk össze. Az 1. ábra az átlagerők rövid mart úthosszra (40 mm) vonatkozó értékét és szórását tünteti fel. A sraffozott mintázatú adatsávok a szerszámtörést szimbolizálják.

Az oszlopdiagram alapján az alábbi következtetéseket vontuk le:

- a legkisebb, azaz legkedvezőbb átlagos erővel a  $\lambda=35^\circ$  horonyemelkedési szögű marók dolgoztak; közülük is a #4 és #5 jelű szerszám forgácsolt legkisebb erőhatásokkal;
- a  $\lambda=40^\circ$  spirálszögű marók használatakor átlagosan 10%-kal nagyobb forgácsolóerők ébredtek a legkedvezőbb horonyemelkedésű szerszámokhoz képest. Ez várható is volt a nagyobb fogankénti előtolásnak köszönhetően, a termelékenységét tekintve 8%-kal kedvezőbb ez a szerszámtípus.
- a  $\lambda=45^\circ$  horonyszögű marók mindegyike eltört. Ennek vélhető oka a forgács leválasztásának viszonya, ami nagy mélységű hornyoknál gyakorta eredményezi a forgács beragadását / újraforgácsolását.



Maró	#1 (35°)	#2 (35°)	#3 (35°)	#4 (35°)	#5 (35°)	#6 (40°)	#7 (40°)	#8 (40°)	#9 (40°)	#10 (45°)	#11 (45°)
$\beta$ [°]	66.2	66.2	74.8	62.3	71.2	77.3	76.0	78.1	71.8	71.0	58.9
$\alpha$ [°]	13.5	13.5	5.2	13.2	10.0	7.3	12.1	10.6	11.3	11.0	12.2
$\gamma$ [°]	10.3	10.3	10.1	14.5	8.9	5.4	1.9	1.3	7.0	8.0	18.9
$d_{mag}$ [mm]	4.83	3.22	3.35	3.35	3.26	3.70	3.69	4.03	3.35	3.78	3.92

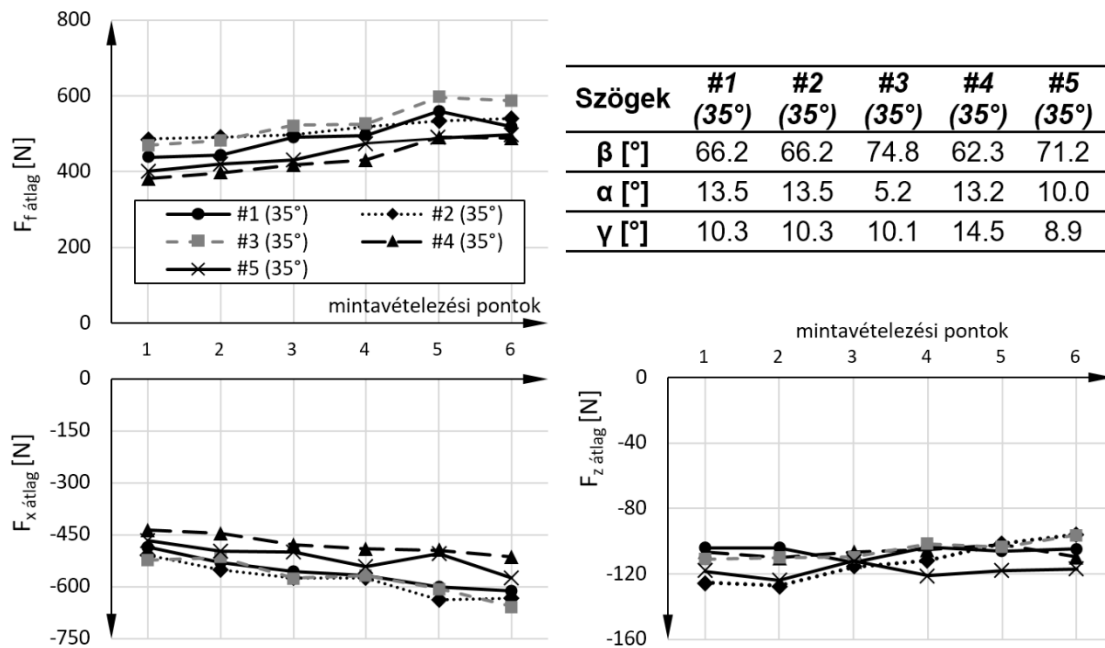


1. ábra Átlagolt forgácsolóerő-értékek és szórásuk a vizsgált maróknál

Cikkünk további fejezeteiben a kedvező szerszámgeometriával elért eredményeket ismertetjük, a kedvezőtlennek ítélt 40° és 45° változatokat nem tárgyaljuk.

## 4.2 A $\lambda=35^\circ$ horonyemelkedésű szerszámok vizsgálatának eredményei

A munkadarab és a ferdehornyú szerszám kapcsolódása, a keletkező forgács hossza és kedvezően kis időt igénylő távozása (azaz az újraforgácsolás esélyének csökkenése) miatt ezek a szerszámok teljesítettek a legjobban: a vizsgálatok során ekkor ébredtek a legkisebb forgácsolóerő-értékek. A #1...#5 jelzésű szármarók erőtanai összehasonlítását a 2. ábra tartalmazza.



2. ábra Az átlagos forgácsolóerők alakulása  $\lambda=35^\circ$ -os maróknál

A forgácsolóerők vizsgálata során az axiális irányú komponensnél ( $F_z$ ) alig volt észrevehető az elhasználódás, azonban az  $F_x$  és  $F_f$  irányú összetevőnél a kopással összefüggő degradáció (a forgácsolóképeség romlása) erőteljesen megjelent már 40 mm út megtételekor is. Tekintve, hogy a hőálló szuperötvözetek hagyományos módszerrel történő marásakor a szerszámok kopásintenzitása jelentős, ezért érdemes olyan folyamatfelügyeleti rendszert alkalmazni, amely a kopáskritérium elérése előtt képes beavatkozásra. Ha azonban a megfelelő geometriájú marót helyes megmunkálási körülmények között használjuk, akkor trochoidális marással ez az intenzitás nagyban csökkenthető. Ez nem csak a tervezhető éltartam szempontjából előnyös, hanem (a szerszám megbízhatóságán keresztül) a folyamatbiztonság is jelentősen növekszik.

A #1 és a #2 jelű szerszámok élgeometriája alapvetően megegyezik. A két termék közötti különbséget az élvédelem jelenti: míg az #1 maró  $r \approx 0,4$  mm sarokrádiuszú, a

#2-es jelű 0,12 mm x 45° letörést tartalmaz. Az átlagos erők alakulását figyelve a sarokrádiuszos kivitelű forgácsolt kisebb erőigénnyel. Ennek oka az lehet, hogy az ív mentén egyenletesebb az él terhelése, kedvezőbb a terheléeloszlás, míg a letörést tartalmazó kivitel enyhén csúcsos, ráadásul a homlok- és palástél találkozásánál nagyon könnyen lepattanhat és/vagy lekophat a szerszámél, így az élvédelem kevésbé tekinthető megoldottnak. A #3 jelzésű szerszám – kis hátszöge miatt – dolgozott a legnagyobb erőigénnyel.

A bevonatolt keményfém szerszámok PVD-bevonatai ridegek, ütésszerű erőhatásokat csak kis mértékben képesek elviselni, azonban a „lággy” változásokkal fellépő erőhatásoknak kiemelkedően ellen tudnak állni. Ezen megfontolásból (ugyancsak 40 mm úthosszakon) az összességében legjobbnak bizonyult #2 és #3 jelzésű szármarókat csökkentett ( $v_c=25$  m/min) forgácsolósebességen is megvizsgáltuk. Az erők alakulását ez a változtatás kedvezően befolyásolta: a #2-es szerszám esetén például az  $F_f$  átlagosan 5%-kal, az  $F_x$  pedig 6%-kal csökkent, míg az  $F_z$  értéke 8%-kal növekedett. Kisebb forgácsolósebességen természetesen az erők ingadozása is csökkent (kedvezőbben alakult), ekkor azonban a termelékenység 16%-kal rosszabb, mint 32 m/min sebességet alkalmazva.

### 4.3 Tartós (hosszú távú) trochoidális marási tesztek

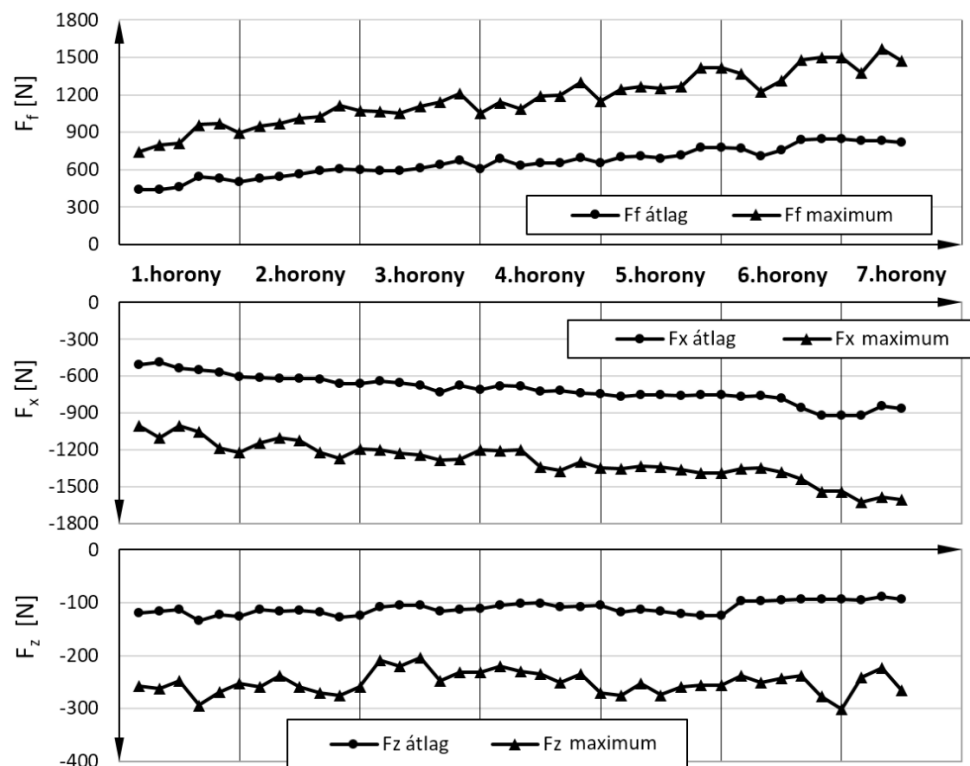
A jelenlegi gyári körülmények között a konvencionális (telibemarással) eljárással maximálisan 80 mm hosszúságú horony készíthető el egyetlen szerszámmal. A kedvezően szereplő,  $\lambda=35^\circ$  horonyemelkedésű marók teljesítőképességének megállapításához hosszan tartó (azaz éltartóssági) vizsgálatot végeztünk az üzemből származó GTD-262 anyagon. Egyetlen horony hossza továbbra is 40 mm volt. Kiemelt célunk volt, hogy rámutassunk a megfelelő marási adatokkal végrehajtott, eddig részletezett TM-eljárás fölényére.

A hosszú távú teszt során a #2 geometriájú marót vizsgáltunk meg, mert ez a szerszám típus dolgozott a legstabilabban a csoportján belül. Csökkentett forgácsolósebességet alkalmaztunk, a trochoidális marás adatai a következők voltak:

$$v_c = 25 \frac{\text{m}}{\text{min}}; w = 0,4 \text{ mm}; h_{\text{átl}} = 0,05 \text{ mm}; a_{e_{\text{max}}} = 1,06 \text{ mm}; a_p = 12 \text{ mm}$$

A tartós vizsgálat eredményeit a 3. ábra szemlélteti. Ezen diagramon nem a mért hátkopási értékeket tüntettük fel, hanem az elhasználódás mértékét az erőkomponensek változásával szemléltettük. A mért erőösszetevők alakulását hornyonkénti 6 mintavételezéssel vizsgáltuk, majd átlagoltuk és így hasonlítottuk össze. Ez alapján a

szerszám erőigénye jelentős mértékben növekedett az első horony megmunkálásához képest. Az 5. horony marásakor már másfélszer akkora előtolás irányú erők ébredtek, mint az első horony megmunkálásakor. A szármarót terhelő axiális erő azonban – a kopás növekedésével – kismértékben csökkent. A 6. horony megmunkálásakor már közel kétszer nagyobb a szerszám erőigénye, mint új állapotában, de még ekkor is megfelelő stabilitással forgácsol. A vizsgálatok során a 6 mm átmérőjű szerszám tartósan elviselt dinamikus változó, 1500 N terhelést, sőt, 1700 N erőnek is gond nélkül ellenállt.



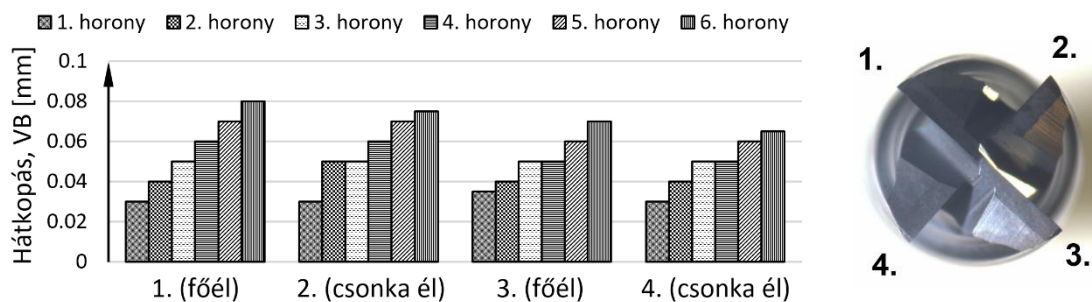
3. ábra #2 szerszám forgácsolóerő komponenseinek alakulása a megmunkált horonyszámok függvényében

Ezen vizsgálat során nagy lépést tettünk előre: a tesztelt #2 jelzésű maró 6 hornyot munkált meg, törés csak a 7. horonyba lépést követő 30 másodpercnél történt. Így összesen 246 mm hasznos horonyhosszt állított elő a szerszám. **A TM-technológia alkalmazásával a konvencionális telibemaráskor elért szerszáméltartamot (80 mm mart hossz) biztonsággal megháromszoroztuk.**

A szerszám kopását vizsgálva nagyon egyenletes, közel lineáris elhasználódást mértünk (4. ábra). A TM szerszámkímélő hatása egyértelműen bebizonyosodott, hiszen 240 mm munkautat (azaz 6 horony marását) követően is még csak  $VB=0,08$  mm hátkopás

alakult ki. A maró legtöbb forgácsot leválasztó (ún. vezéréle) az első központi él volt, emiatt a többi élhez képest enyhén nagyobb a hátkopása.

A szerszám kiemelkedő teljesítménye annak köszönhető, hogy jó minőségű, finomszemcsés alapkeményfém-ből készült, továbbá a dolgozó hossz csak a szükséges méretű (a mart horony mélysége +1...2 mm) volt, emiatt a szerszám kitűnő merevségű. Az ilyen, nagyon nehezen megmunkálható anyagminőségekben ez döntő fontosságú.

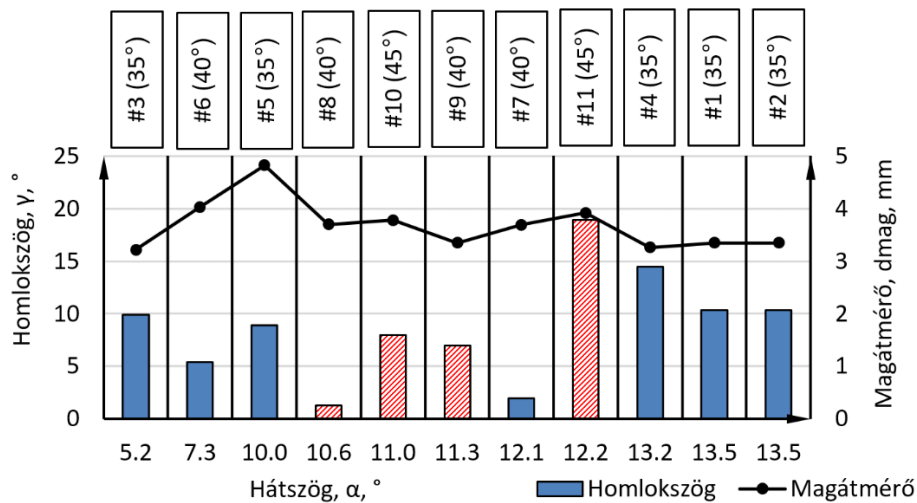


4. ábra A #2 szerszám kopása a megmunkált szakaszok végén

## 5 Szerszámgeometria kiválasztásának szabályai trochoidális maráshoz

Közel négyéves kutatómunkánk során módunk nyílt számos anyagminőség (szerkezeti és nemesített szerszámacél, illetve a HRSA- anyagok, vagyis többféle korrózióálló acél, nikkel- és kobaltbázisú szuperötvözetek) trochoidális marására. A változatos üzemi feladatok sokféle vizsgálati körülményt (egyenes és ívelt horonyok, változatos horonyméret, nagy kinyúlású szerszámok,  $\varnothing 6 \dots \varnothing 12$  mm szerszámtérők stb.) jelentettek számunkra. Az adatok módszeres gyűjtése és adatbázisba rendezése révén nagy tapasztalatra tettünk szert az előírt ciklusidőhöz tartozó szerszámpályák generálása területén.

A nikkelbázisú szuperötvözetbe (konkrétan: GTD-262) készített  $\approx 2 \times D_c$  mélységű egyenes horonyok trochoidális marása speciális szerszámgeometriát igényel. A megfelelő szerszámtérő és fogszám meghatározását korábban már publikáltuk [2, 3, 5], most az alkalmas élgeometria kiválasztásának két szabályát adjuk meg. A TM-eljárásnál alkalmazott maró kulcsfontosságú szöge az elsődleges hátszög ( $\alpha$ , °). Vizsgálataink azt mutatták, hogy nem felel meg az a maró, amelyik hátszögére (és a hozzá tartozó egyéb geometriai adatokra) igaz a  $10^\circ \leq \alpha,^\circ \leq 12^\circ$  reláció (5. ábra).



5. ábra A vizsgált marók hátszögei a homlokszögek és a magméretek függvényében

Első szabályt a (2) összefüggés fejezi ki,  $10^\circ$ -nál kisebb hátszögekre. A megfelelő ékhatás és él merevsége csakis akkor garantált, ha a homlokszög megfelelő értéke  $10^\circ$  alatti (de pozitív!). Ha ugyanis a homlokszöveget nagyobb értékűre engednénk, akkor a csökkenő élstabilitás miatt az igen nagy fajlagos forgácsolóerejű és felkeményedő anyagban a szerszám valószínűleg eltörne. Ráadásul a kicsiny hátszög miatt a hátlap „nyomja” és marás közben felkeményíti az anyagot, ami – az esetleges forgácsberagadással / újraforgácsolással együtt – növeli a szerszám kihajlásának veszélyét is. Amennyiben ellenőrzéskor a kritikus  $\alpha$  és  $\gamma$  szögek nem jók, a közölt képlet negatív értéket eredményez, ami pedig azt jelzi, hogy a szerszámot nem tanácsos GTD-262 anyag trochoidális marásához alkalmazni.

$$\alpha_{<10^\circ} = (10 - \alpha) \cdot (10 - \gamma) > 0 \quad (2)$$

A szóba jöhető szerszámok másik kategóriája azon marókat foglalja magában, amelyek hátszöge nagyobb, mint  $12^\circ$ . Ekkor a pozitív homlokszög értéke gyakorlatilag  $18^\circ$ -ig is változhat. Ez esetben ugyanis a nagy hátszög nem okoz túlzott hátfelületi nyomást a megmunkált anyagra, ami egy nagyobb homlokszöggel és egy megfelelően stabil magmérettel párosulva könnyebben képes forgácsolni az anyagot. Elsősorban ezért váltak be annyira a #1, #2 és #4 jelölésű marók. Amennyiben ellenőrzéskor a kritikus  $\alpha$  és  $\gamma$  szögek nem jók, és a közölt képlet eredménye negatív, a szerszámot nem tanácsos GTD-262 anyag trochoidális marásához alkalmazni.

$$\alpha_{>12^\circ} = (\alpha - 12) \cdot (18 - \gamma) > 0 \quad (3)$$

A fenti szabályok kiegészülnek még a  $\lambda$  horonyszög megválasztásával is. Tapasztalataink szerint TM-nél a  $45^\circ$  spirálemelkedésű szerszámok semmiképpen sem jöhetnek szóba, ha a horonymélység  $2xD_c$  vagy annál is nagyobb: akkor ugyanis a forgács nem tud „elszakadni” és a következő homlok- vagy palástél újratorgácsolja. Más a helyzet akkor, ha a maró élein fogosztásra alkalmas hornyokat („kordel-fogazás”) képeznek ki.

A szabályok „ellenőrzésére” az 5. táblázat szolgál. Ebben az alkalmas marók mindegyike a szabályok szerint kiszámolt pozitív mérőszámot kapott. A mérőszám mértéke egyfajta sorrendet is felállít a választások között, a legnagyobb a leginkább kedvező és fordítva. Az általunk nem ajánlott szerszámok negatív mérőszámot, illetve „X” jelölést kaptak.

Egyértelműen látszik az, hogy például a #11 jelzésű maró (élgeometriája alapján) kevésbé alkalmas, mint a pozitív mérőszámmal rendelkező marók.

5. táblázat Szerszám kiválasztás szabályainak validálása a tesztelt marókra

Maró / szabály	#1 ( $35^\circ$ )	#2 ( $35^\circ$ )	#3 ( $35^\circ$ )	#4 ( $35^\circ$ )	#5 ( $35^\circ$ )	#6 ( $40^\circ$ )	#7 ( $40^\circ$ )	#8 ( $40^\circ$ )	#9 ( $40^\circ$ )	#10 ( $45^\circ$ )	#11 ( $45^\circ$ )
$\alpha < 10^\circ$			0.48		0.03	12.39		X	X	X	
$\alpha > 12^\circ$	11.52	11.52		4.35			1.45	X	X	X	-0.18

Természetesen a fenti szabályok csak a szerszámgeometriát veszik figyelembe, a szerszám törését befolyásoló egyéb tényezőket, mint például a különböző gyártó cégek eltérő előállítási körülményeit, az alapkeményfém típusát, az élkiképzést, az élpreparáció mértékét, a bevonatolás minőségét stb., nem tartalmazzák. E hatásokkal – a gyártókkal kötött megállapodás értelmében – a későbbiekben fogunk részletesen foglalkozni.

## 6 Az elért eredmények összefoglalása

A végrehajtott kísérletekkel sikerült meghatároznunk azokat az élgeometriai elemeket, amelyek a nikkelbázisú szuperötvözet trochoidális forgácsolásakor jól teljesítettek. Az általunk használt forgácsolási adatok még tovább optimalizálhatók, mert jelen kutatási fázisban kísérletünk célja csupán a tesztelt szerszámok teljesítőképességének összehasonlítása és a tartós munkára képes geometriai jellemzők megtalálása volt. A

technológia optimalizálása csak a szóba jöhető legjobb szerszámgeometria ismeretében kifizetődő.

Kiemelkedően teljesített a vizsgálatok során a #2 jelű,  $\lambda=35^\circ$  horonyemelkedésű szerszám, mert a TM-eljárással összesen 240 mm hosszt munkált meg, szemben a konvencionális eljárással, ahol mindössze  $\leq 80$  mm hosszúságú hornyot lehetett egy maróval előállítani. Ezzel a szerszámmal az éltartamnövekedés 3-szoros, úgy, hogy a trochoidális marási stratégia esetén a megmunkálási idő *közel azonos* volt a telibemarással nagylási idejével.

A szóba jöhető szerszámgeometria  $10^\circ$ -os hátszög alatt  $10^\circ$  alatti pozitív homlokszög,  $12^\circ$  feletti hátszög esetében pedig  $5-18^\circ$  közötti pozitív homlokszög. A  $2x D_c$  mélységű hornyok marásához nem tanácsos a hagyományos élkialakítású,  $45^\circ$  spirálszögű szerszámot választani.

A közölt eredmények alapján a trochoidális marási eljárás alkalmazása GTD-262 anyagminőségben is hatékony, azonban a technológia optimalizálásához és a szerszám kiválasztás fizikai modelljének megalkotásához még további kísérletek végrehajtására van szükség.

### Irodalomjegyzék

- [1] Alternatív marási metódusok kísérleti vizsgálata (Experimental study of alternative milling methods), OE-BGK, Budapest, 2015, pp. 19.
- [2] Szalóki, I., Sipos, S., Tállai, P.: HRSA-anyagminőség növelt termelékenységgű trochoidális marása. Gyártóeszközök, szerszámok, szerszámgépek, XVIII. évf. 2015. p. 49-55.
- [3] Szalóki, I., Csuka, S., dr. Sipos, S.: Különleges mozgásciklusok alkalmazása nehezen forgácsolható anyagok marásánál. Gyártóeszközök, szerszámok, szerszámgépek, XVI. évf. 2013. p. 68-73.
- [4] Szalóki, I., Csuka, S., Sipos, S.: Trochoidal Milling Operations (OE-BGK-GGYT), online 2014.02.14., The different types of trochoidal milling are widely used in order to produce grooves and slots: <https://www.youtube.com/watch?v=Q382XQn8-28>
- [5] Szalóki, I., Csuka, S., Sipos, S.: New Test Results in Cycloid-Forming Trochoidal Milling, Acta Polytechnica Hungarica, Vol. 11, No.2, 2014. p. 215-228, ISSN 1785-8860 IF 0.649 ([http://www.uni-obuda.hu/journal/Szaloki\\_Csuka\\_Sipos\\_48.pdf](http://www.uni-obuda.hu/journal/Szaloki_Csuka_Sipos_48.pdf))
- [6] Szalóki, I. – Csesznok, S. – Csuka, S – Sipos, S.: Can trochoidal milling be ideal? Manufacturing 2012 The XXI. Conference of GTE on Manufacturing and related technologies, Budapest, November 15-16. 2012. Session #5, CD version, S6\_08., pp. 10. ISBN 978-963-9058-35-4



[7] M. Otkur, I. Lazoglu: Trochoidal milling Manufacturing Automation and Research Center, Mechanical Engineering Department, Koc University, Istanbul, 2006, pp. 9.