

# Trochoidális marás alkalmazása edzett acél mikromegmunkálása esetén

## The application of the trochoidal milling at micromachining of hardened steel

BALÁZS Barnabás Zoltán<sup>1</sup>, PhD, adjunktus, JACSÓ Ádám<sup>2</sup>, PhD, adjunktus, TAKÁCS Márton<sup>3</sup>, PhD, egyetemi docens

<sup>1,2,3</sup> Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Gyártástudomány és – technológia Tanszék, H-1111, Budapest, Műegyetem rakpart 3., Tel.: +36 1 463 2515, www.manuf.bme.hu, <sup>1</sup>balazs.barnabas.zoltan@gpk.bme.hu, <sup>2</sup>jacso.adam@gpk.bme.hu, <sup>3</sup>takacs.marton@gpk.bme.hu

### Abstract

*The increasing demand for miniature components from the industry and the more and more strict quality requirements poses a huge challenge to modern manufacturing. The research support mainly the production of micro-injection moulding tools, and the main aim is to adapt trochoidal milling strategies to the world of micro sizes and to investigate their applicability from the dynamic aspects of the process (cutting forces, vibrations).*

**Keywords:** cutting, micro-milling, dynamic milling strategies, trochoidal tool path, cutting forces

### Kivonat

*A kisméretű alkatrészek iránti fokozódó ipari igény, valamint az egyre szigorúbb minőségi követelmények folyamatosan egyre nagyobb kihívásokat támasztanak a mikromegmunkálási eljárásokkal szemben. Jelen kutatás elsősorban a mikrofröccsöntő szerszámok előállítását tartja szem előtt, a fő célja pedig a trochoidális marási stratégiáknak a mikroméretes világába történő adaptálása, valamint az alkalmazhatóságának a vizsgálata a folyamat dinamikai aspektusaiból (forgácsolás erői, rezgései).*

**Kulcsszavak:** forgácsolás, mikromarás, dinamikus marási stratégiák, trochoidális szerszám-pálya, forgácsolási erő

## 1. BEVEZETÉS

Napjaink korszerű ipari ágazataiban, mint például az űrkutatás, autóipar, repülőgépipar, valamint mikroelektronika, egyre nagyobb számban van szükség miniatűr alkatrészekre, ezzel egyidejűleg pedig a minőségi elvárások is fokozódnak. Így az igények egyre nagyobb kihívásokat támasztanak a modern gyártástechnológiával szemben. A mikromarás technológiájának nehézségei között említhetők például, a méretcsökkenés következtében a relatív nagy élekkerekedési sugár és a minimális forgácsvastagság problémaköre, valamint az erőteljes rezgések és a relatív nagy szerszámdeformáció [1]–[3]. A mikromarás egyik további fő alkalmazási területe a mikrofröccsöntő szerszámok előállítása, ahol gyakran hosszú megszakítás nélküli pályákra van szükség. A rendelkezésre álló szerszámél nagyobb kihasználtságára, valamint a termelékenység növelésére dinamikus marási pályák, illetve a trochoidális marási stratégiák nyitnak lehetőséget. Ezen stratégiák előnyei között említhető, hogy a jelentősen megnövelt fogásmélység hatására egy nagyobb élszakasz áll kontaktban a munkadarabbal, így kedvezőbb körülmények között tud távozni a forgács, jobban eloszlik a keletkező hő, valamint a kopás sem a szerszám 'sarkára' koncentrálódik, hanem egy hosszabb élszakasz mentén oszlik el [4], [5].

A kutatás célja a trochoidális marási pályáknak a mikroméretes világba történő adaptálása és kísérletek végzése egy 50 HRC keménységű AISI H13 megalakító szerszám-acélon, mely mikrofröccsöntő szerszámok alapanyagául is szolgálhat. További cél a trochoidális mikromarás dinamikai aspektusainak a tanulmányozása, a különböző szerszám-pályák vizsgálata és a dinamikai jelenségek forgácsolási paramétereiktől való függésének megállapítása.

## 2. KÍSÉRLETI KÖRÜLMÉNYEK

A vizsgálatokhoz egy sajátos mérési környezetet állítottunk össze, mely alkalmas a mikromarás folyamatának a részletes vizsgálatára. A kísérletekhez egy VHTC típusú öttengelyes mikromegmunkáló központot alkalmaztunk, aminek a maximális fordulatszáma 60 000 1/min. A felhasznált mikromaró szerszám 500  $\mu\text{m}$  átmérőjű volt, amin 50  $\mu\text{m}$ -es sarokrádiusz biztosította a fokozott élstabilitást. A dinamikai jelenségek mérésére egy Kistler 9257A típusú háromkomponenses erőmérő platformot alkalmaztunk, amit egy Kistler 5080A töltéserősítőn keresztül csatlakoztattunk az NI 4431 adatgyűjtőbe. A kísérletek során mért erőértékeket pedig egy saját fejlesztésű LabVIEW kiértékelő szoftverrel rögzítettük.

A vizsgálatok során 5 mm hosszú, 1 mm széles hornyokat martunk. A kísérleteknél alkalmazott beállítások az 1. táblázatban láthatók, melyekhez egy korábbi tanulmányunk biztosított alapot, ahol a dinamikus marás esetén jellemző körülményeket vizsgáltuk mikroméreteken [6].

### Kísérletterv

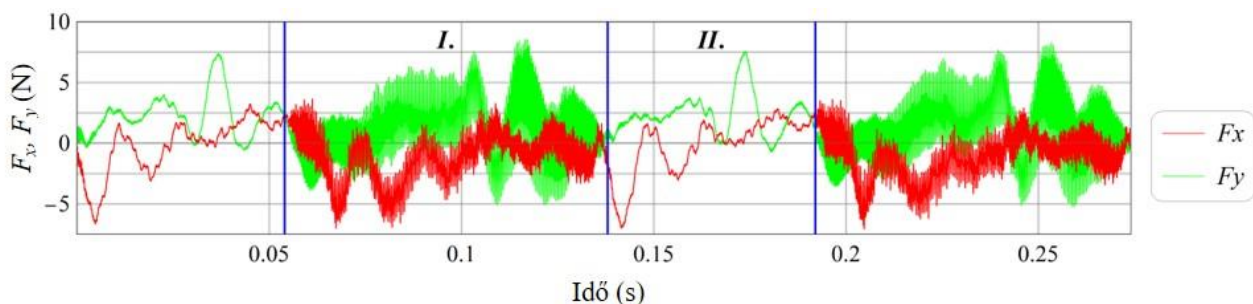
### 1. táblázat

Paraméterek	$v_c$ (m/min)	$a_p$ ( $\mu\text{m}$ )	$f_z$ ( $\mu\text{m}$ )	$\theta$ ( $^\circ$ )	Pálya típus	Marási stratégia
Értékek	90	200	6	45, 60, 75	Köríves, Ciklois	Egyenirányú marás

## 3. EREDMÉNYEK

Az erőjelek elemzése elsődleges fontosságú a mikromarás technológiájának mélyebb megértése miatt, valamint a kutatás tárgyát képező trochoidális szerszám pályák esetén történő megmunkálásokról is fontos információkat szolgáltat.

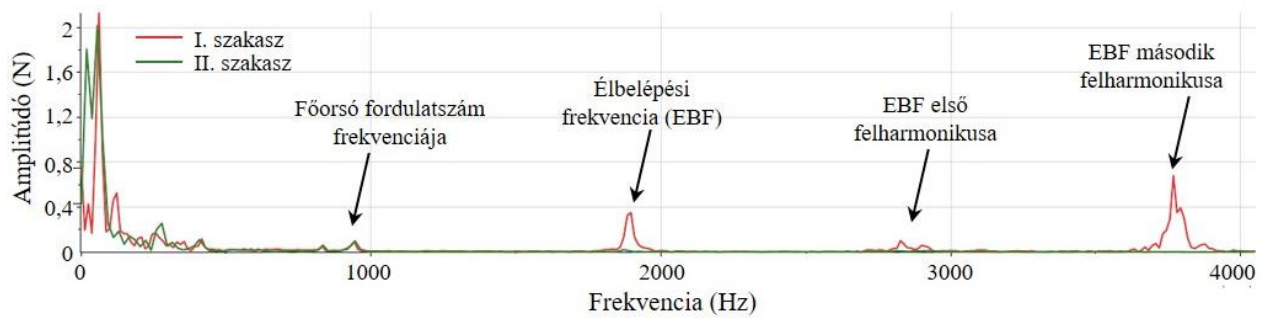
Az 1. ábrán látható egy feldolgozatlan (nyers) erőjel az  $F_x$  és  $F_y$  erőkomponensből (60°-os kontaktszög, köríves pálya). A kísérletek során az erőmérőcellával együtt mozgó munkadarab dinamikus mozgása, illetve annak a tehetetlensége miatt az erőjelben is látható az alacsony frekvenciájú alapjel. Ezen indoknál fogva a kiértékelő programok elkészítését megelőzően szükséges tanulmányozni a nyers jel sajátosságait, illetve elkülöníteni a forgácsolási és az 'üresjárat' szakaszokat. Ehhez az Ni DIAdem szoftvert alkalmaztuk. Az ábrán az I. jelöli a forgácsleválasztás szakaszát, a II. pedig a ciklus többi, forgácsleválasztás nélküli részét. Az itt látható behatárolás pedig pontos összhangban van az  $F_z$  erőkomponenssel, ahol a forgácsleválasztástól különböző erőhatások nem jelentkeztek. A kettő megjelölt ablak (I. és II. tartomány) pedig együttesen egy teljes ciklusa a trochoidális pályának.



1. ábra. A nyers erőjelen látható ciklusok és jellegzetes szakaszai

Azonosítva a jellegzetes cikluselemeket, szakaszokat, frekvenciaanalízist végeztünk, aminek segítségével elkülöníthetők a mérőrendszer mozgásából származó, de nem közvetlenül a forgácsleválasztás folyamatát jellemző frekvenciák. Az ehhez kapcsolódó FFT (gyors Fourier transzformáció) diagramot a 2. ábra mutatja be. A zöld görbe jelöli az üresjáratú szakaszt jellemző frekvenciákat, a piros pedig a forgácsoláshoz kapcsolódó jellegzetes frekvenciákat.

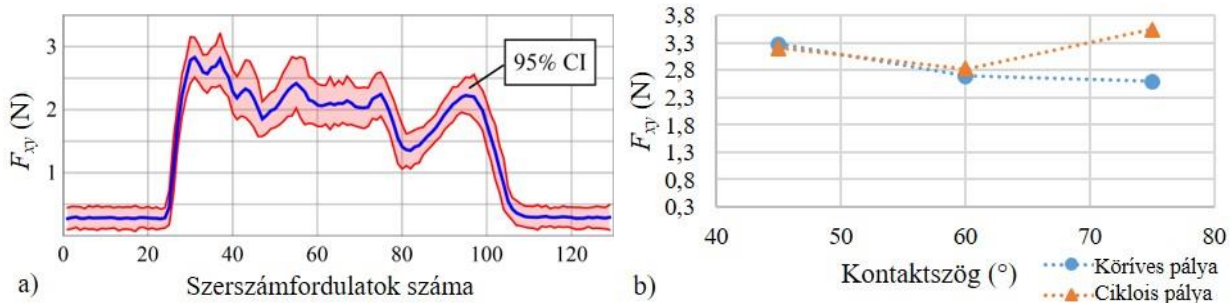
A diagramon mindkét esetben látható a ~955 Hz, ami a főorsó fordulatszámának felel meg. A forgácsolás esetén pedig megjelenik az élék belépési frekvenciája ~1910 Hz, illetve ennek 1. és 2. felharmonikusa is. Ez alapján az adatsorok további feldolgozásához egy 400 Hz-s felüláteresztő szűrést alkalmaztunk, így megkapva a forgácsleválasztás szempontjából értékes információkat.



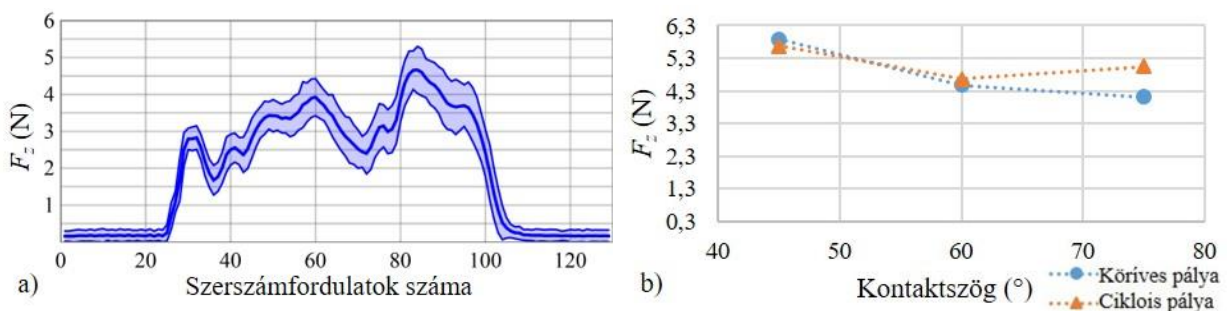
2. ábra. Frekvencia - amplitúdó diagram a nyers erőjel I. és II. szakaszaihoz

Az erőkhöz kapcsolódó elemzéseket Wolfram Mathematica 12 programban végeztük. A nyers erőjeleket a trochoidális pályáknál jellemző ciklikus ismétlődések szerint felbontottuk, és igazodva a forgácsolt struktúrahossz alapján rendelkezésre álló adatmennyiséghez, egységesen 50 db ismétlődő pályaelem átlagát vettük alapul az erőlefutások elemzése során. Jelen tanulmányban a síkbeli erők ( $F_{xy}$ ) és az axiális erőkomponens ( $F_z$ ) elemzésére koncentráltunk. Az  $F_{xy}$  a szerszám axiális tengelyére merőleges síkban ébredő  $F_x$  és  $F_y$  erőkomponensek eredőjét jelenti.

A 3 a) ábra a trochoidális pályák esetén jellemző karakterisztikus erőlefutást mutatja, melyen a kék görbe az átlagértéket jelzi, ami mellett pedig a 95%-os konfidencia intervallum látható. Mindegyik vizsgált beállítás mellett megfigyelhető jelenség volt, hogy a belépést követő szakaszban van a maximum érték, amit egy kisebb visszaesés követ, emellett pedig kisebb mértékű ingadozások is megjelennek a forgácsleválasztási szakaszban. A hagyományos méretekhez képest eltérésként megemlíthető az erőlefutást jellemző alak, amit a mikromarás sajátosságai okozhatnak a mérethatás következtében. Makroméreteknél, általános esetben, a görbe lassabb felfutású és a maximum erő a horony középvonalában éri el a maximumot, ahol a kvázi állandó kontaktszög, a geometriai sajátosságok miatt, felveszi a maximális értékét [7].



3. ábra. (a) Az egymásra vetített ciklusok átlaga és konfidencia intervalluma az  $F_{xy}$ -nél ( $\Theta=60^\circ$  és ciklois pálya) és (b) a maximális erőértékek alakulása a különböző beállítások mellett



4. ábra. (a) Az egymásra vetített ciklusok átlaga és konfidencia intervalluma az  $F_z$ -nél ( $\Theta=60^\circ$  és ciklois pálya) és (b) a maximális erőértékek alakulása a különböző beállítások mellett

A 3 b) diagramon láthatóak a különböző beállításokhoz tartozó maximális erőértékek. A diagram alapján jól látható, hogy  $45^\circ$  és  $60^\circ$ -os kontaktszög esetében nincs jelentős különbség a köríves és a ciklois pályák között. A vizsgált paraméterek alapján a legkedvezőbb beállítás a köríves stratégia és a  $75^\circ$ -os kontaktszög alkalmazása. Ez a kontaktszög bizonyult a legkedvezőbbnek a korábbi, dinamikus mikromarással foglalkozó

tanulmányunkban is [6], azonban a trochoidális körülményekre történő kiterjesztésnél az egyéb tényezők is befolyásolják az eredményeket.

A 4 a) ábrán az axiális erőkomponenshez tartozó karakterisztikus erőlefutás látható a 60°-os kontaktszög mellett ciklois pálya esetén. Jól megfigyelhető, hogy az  $F_{xy}$  –nal ellentétben itt nem a belépés után látható a maximális erő, hanem fokozatosan növekszik az erő egészen a forgácsolásban töltött pályaszakasz végéig, majd az csak a kilépés előtti pillanatban veszi fel a maximum értékeket. A 4 b) ábrán pedig az  $F_z$  komponenshez tartozó maximum értékek láthatóak, melyek az előzőekben bemutatotthoz ( $F_{xy}$  komponens) hasonlóan alakultak. Itt szintén a 75°-os kontaktszög és a köríves stratégia mellett jelentek meg a legkisebb erők.

A kapott eredmények alapján célszerű a nagyobb kontaktszög kiválasztása/beállítása, mivel az nagyobb termelékenységet eredményez, azonban a vizsgálatok alapján az erőkben nem nyilvánul meg a kisebb kontaktszög esetleges előnye.

## 4. ÖSSZEFOGLALÁS

Vizsgálatokat végeztünk a trochoidális pályákban rejlő potenciál feltérképezésére, kiaknázására a mikroméreték világában. A kísérletek során egy öttengelyes mikromegmunkáló központot alkalmaztunk, amin 500  $\mu\text{m}$  átmérőjű mikromaróval forgácsoltunk 50 HRC keménységű edzett állapotú AISI H13 típusú melegalakító szerszámacélt. A kutatás eredményeként megállapítottuk, hogy a trochoidális marás mikroméretékben is előnyösen alkalmazható, valamint megvizsgáltuk a különböző kontaktszögek és a trochoidális marási pályáknak a folyamat dinamikai jellemzőire gyakorolt hatását. Az eredmények alapján megállapítottuk, hogy az erők alapján célszerű a nagyobb kontaktszögek beállítása, mivel a termelékenységet növeli, azonban a vizsgálatok alapján nem jelentkezik a kisebb kontaktszögekben esetlegesen rejlő előny.

A jövőben javasolt a paraméterek szélesebb körű vizsgálata, valamint a marási stratégiák összehasonlítása, továbbá a vizsgálatok kiterjesztése a felületi minőségre és a sorjaképződésre is.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatás az Innovációs és Technológiai Minisztérium OTKA-K-132430 (Tranziens deformációs, termikus és tribológiai folyamatok kemény fémfelületek finomforgácsolásánál) és ED\_18-2-2018-0006 (Kutatások az ipari digitalizáció által nyújtott potenciál minőségi kiaknázására) kódszámú projektjeinek a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott támogatásával készült. A szerzők hálásak a Fraisa és Böhler cégek támogatásáért.

## IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] O'Toole L., Kang C.-W. és Fang F.-Z. *Precision micro-milling process: state of the art*, Adv. Manuf., köt. 9, sz. 2, o. 173–205, 2021, doi: 10.1007/s40436-020-00323-0.
- [2] Câmara M. A., Rubio J. C. C., Abrão A. M. és Davim J. P. *State of the Art on Micromilling of Materials, a Review*, J. Mater. Sci. Technol., köt. 28, sz. 8, o. 673–685, 2012, doi: 10.1016/S1005-0302(12)60115-7.
- [3] Balázs B. Z., Geier N., Takács M. és Davim J. P. *A review on micro-milling: recent advances and future trends*, Int. J. Adv. Manuf. Technol., köt. 112, sz. 3, o. 655–684, 2021, doi: 10.1007/s00170-020-06445-w.
- [4] Otkur M. és Lazoglu I. *Trochoidal milling*, Int. J. Mach. Tools Manuf., köt. 47, sz. 9, o. 1324–1332, júl. 2007, doi: 10.1016/j.ijmactools.2006.08.002.
- [5] Szalóki I., Csuka S. és Sipos S. *New test results in cycloid-forming trochoidal milling*, Acta Polytech. Hung., köt. 11, sz. 2, o. 215–228, 2014.
- [6] Balázs B. Z., Jacsó Á., és Takács M. *Micromachining of hardened hot-work tool steel: effects of milling strategies*, Int. J. Adv. Manuf. Technol., köt. 108, sz. 9, o. 2839–2854, 2020, doi: 10.1007/s00170-020-05561-x.
- [7] Jacso A., Matyasi Gy. és Szalay T. *Trochoidal tool path planning method for slot milling with constant cutter engagement*, Lect. Notes Mech. Eng., o. 8, 2020.