

HURKOLT SZERSZÁMPÁLYA ALKALMAZÁSA A SZERSZÁMKOPÁS ÉS A FORGÁCSOLÓ ERŐ CSÖKKENTÉSE ÉRDEKÉBEN NI-ALAPÚ ÖTVÖZETEK PALÁSTMARÁSAKOR

APPLICATION OF TROCHOIDAL TOOLPATH TO REDUCE TOOL WEAR AND CUTTING FORCE DURING FLANK MILLING OF NICKEL-BASED ALLOYS

Kónya Gábor^{0000-0003-1531-5921 1,2*}, Kovács Zsolt^{Ferenc0000-0002-6995-6508 1}, Jacsó Ádám^{0000-0001-8247-2332 3}

¹ Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem, Magyarország

² Gépjárműtechnológia Tanszék, Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Magyarország

³ Gyártástudomány és -technológia Tanszék, Gépészmérnöki Kar, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Magyarország

<https://doi.org/10.47833/2024.3.ENG.010>

Kulcsszavak:

Ni-bázisú szuperötvözet
Palástmarás
Forgácsoló erő
Szerszámkopás

Keywords:

Ni-based superalloy
Flank milling
Cutting force
Tool wear

Cikktörténet:

Beérkezett 2024. augusztus 28.
Átdolgozva 2024. november 14.
Elfogadva 2024. november 25.

Összefoglalás

A Ni-bázisú szuperötvözetek a HRSA (High Resistant Super Alloys) ötvözetek közé tartoznak nagy melegszilárdságuknak, korrózióállóságuknak és alacsony hővezetőképességüknek köszönhetően. Ezen tulajdonságok miatt az egyik legnehezebben megmunkálható anyagok közé tartoznak, ezért a szerszámok gyors tönkremenetele komoly kihívást jelent a forgácsolási eljárások során. Jelen kutatásunkban palástmarás és horonymarás során vizsgáltuk az egy fogásban eltöltött idő, a fogások közötti visszahúlési idő és a begördülési sugár hatását a forgácsoló erőre és a szerszámkopásra nézve.

Abstract

Nickel-based superalloys belong to the HRSA (High Resistant Super Alloys) category due to their high-temperature strength, corrosion resistance, and low thermal conductivity. These properties make them difficult to machine, resulting in rapid tool wear deterioration. In this research, we investigated the effects of time spent in a single pass, cooling time, and radius of curvature on cutting force and tool wear during flank and slot milling.

1. Bevezetés

Az iparban folyamatosan növekvő igényeket kell kielégíteni mind a megmunkálási minőség, mind hatékonyság tekintetében [1], [2]. Ez azonban komoly kihívásokat jelent a forgácsolási technológia számára, különösen a nehezen megmunkálható anyagok, például a szuperötvözetek [3], [4], kompozitok [5], [6], valamint a kemény és rideg anyagok esetében [7]. A szigorú gyártási

* Kónya Gábor
E-mail cím: konya.gabor@nje.hu

követelmények teljesítése szükségessé teszi a gyártási rendszer és a használt technológia minden elemének folyamatos fejlesztését és optimalizálását [8], [9].

A szuperötvözeteket nehezen forgácsolható anyagokként tartják számon különleges tulajdonságaik miatt. Ezek közé tartozik a nagy melegszilárdság és keménység magas hőmérsékleten, a megmunkálás közbeni felkeményedés, az alacsony hővezetőképességből adódó jelentős hőtermelés a forgácsolási zónában, valamint az ötvözet kémiai affinitása a szerszámokhoz. Emellett a szuperötvözetek nagy tapadási hajlama erős élrátétképződéshez (BUE) vezethet, és a forgácsoló éleken kialakuló intenzív hasítékos kopás is hozzájárul ahhoz, hogy megmunkálásuk különösen nehéz feladat legyen [10], [11], [12]. A marási eljárások közül az egyik legáltalánosabb megmunkálás a palástmarás, mely során a szerszám forgástengelyével párhuzamos felületeket alakítunk ki. A fent említett tönkremeneteli módok palástmarás során is jelentkeznek, annak ellenére, hogy a szerszám viszonylag kis kontaktszög mentén érintkezik a megmunkálandó kontúrral. A forgácsolástechnikai kutatásokban és az ipari alkalmazásokban is számos módon igyekeznek a szerszám éltartamát növelni ezen ötvözetek marása során, melyek többnyire a technológiai paraméterek optimalizálását [13], [14], valamint a hűtés-kenési eljárások hatékonyságának növelését célozzák meg [11], [15]. Az irodalomkutatás során azonban nem találtunk arra vonatkozó információt, hogy milyen hatással van a szerszámkopásra és a forgácsolóerőre, ha bizonyos szakaszonként rövid időre megszakítjuk a palástmarást. Ez a tanulmány a nikkelalapú szuperötvözeteknek egy speciális hurkolt szerszám-pálya mentén történő marási folyamatát vizsgálja, különös tekintettel a szerszámkopás és a forgácsoló erő elemzésére.

2. Kísérleti módszertan

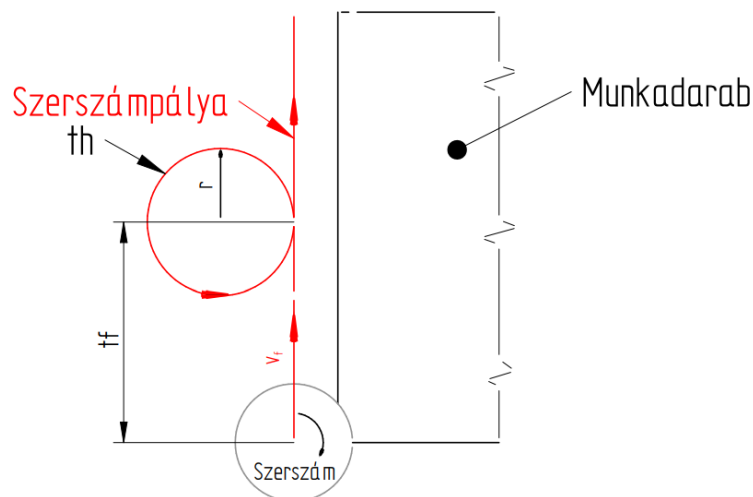
A vizsgálatainkban arra a kérdésre kerestük a választ, hogy a nehezen megmunkálható nikkel ötvözetek esetében növelhető-e a szerszám éltartama azáltal, hogy időnként megszakítjuk a forgácsolási folyamatot, ezzel időt biztosítva a szerszám visszahűléséhez. Az egy fogásban eltöltött idő, a visszahűlés idő és a begördülési sugár hatásainak vizsgálatához kapcsolódó kísérletterv az 1. táblázatban látható. A vizsgált paraméterekhez tartozó sematikus vázlatot az 1. ábra szemlélteti. A forgácsoló erő kiértékelésénél a szerszám tengelyére merőleges síkban számított vetületet (F_{xy}) vettük figyelembe. A forgácsolás során a környezeti hőmérséklet körülbelül 20 °C volt.

1. Táblázat. Kísérleti körülmények

Szerszámgép	NCT EmL-850D 5AX										
Szerszám	BZL4D080R00L064S18-T03O03FM cikkszámú, 4 élű, monolit keményfém szármáró AlTiN bevonattal										
Erőmérő	Kistler 9257B típusú, 3 komponensű, piezoelektromos elven működő erőmérő, Kistler 5007 típusú analóg jelerősítő, Kistler 5697 típusú jelfeldolgozó egység, mérési pontossága ± 5 N Adatrögzítés: Dynoware szoftver Kiértékelés: Wolfram Mathematica										
Alapanyag	GTD-111										
Mechanikai tulajdonság jellemzők	Szakítószilárdság, R_m (MPa)			Nyúlás A_5 (%)			Kontrakció Z (%)		Keménység (HRC)		
	1310			8			5		41,4		
Fizikai tulajdonságok	Sűrűség ρ (kg/m ³)				Hővezetőképesség 20 °C-on λ (W/m·K)				Fajhő 20 °C-on c (J/kg·K)		
	8000				12,56				0,452 x 10 ³		
Kémiai összetétel	Ni (%)	C (%)	Cr (%)	Co (%)	Al (%)	Ti (%)	W (%)	Mo (%)	Ta (%)	B (%)	
	62,37	0,08	13,7	9,00	2,80	4,70	3,50	1,40	2,4	0,05	

2. Táblázat. Kísérletterv

Megmunkálás típusa	Palástmarás, megmunkálási hossz 3x100 mm = 300 mm			
Technológiai paraméterek	Forgácsoló sebesség, v_c (m/min)	Fogankénti előtolás, f_z (mm/fog)	Fogásmélység, a_p (mm)	Fogás-szélesség, a_e (mm)
	25	0,015	8	0,8
Emulzió	MOL Emolin 120 típusú, biostabil, vízzel elegyíthető, fél-szintetikus olaj, koncentráció érték: 9% Hőmérséklete forgácsolás közben: kb. 30 °C Mennyisége a szerszámgépben: 200 l.			
Hátkopás mérés	Zeiss SteREO Discovery V8 fénymikroszkóp			
Vizsgált paraméterek palástmarás során				
	Értékek		Állandó paraméterek	
Egy fogásban eltöltött idő, t_f (s)	300; 1; 3; 6; 12; 18; 24		$t_h = 3s$; $r=0,75$	
Visszahúlési idő, t_h (s)	0; 0,5; 1; 3; 5		$t_f = 6s$; $r=0,75$	
Begördülési sugár, r (s)	0,1; 0,25; 0,5; 0,75; 1		$t_f = 6s$; $t_h = 3s$	



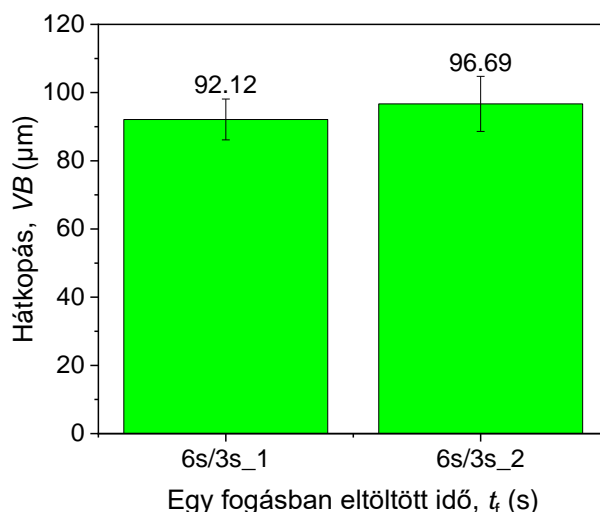
1. ábra: Palástmarás sematikus ábrája

3. Eredmények

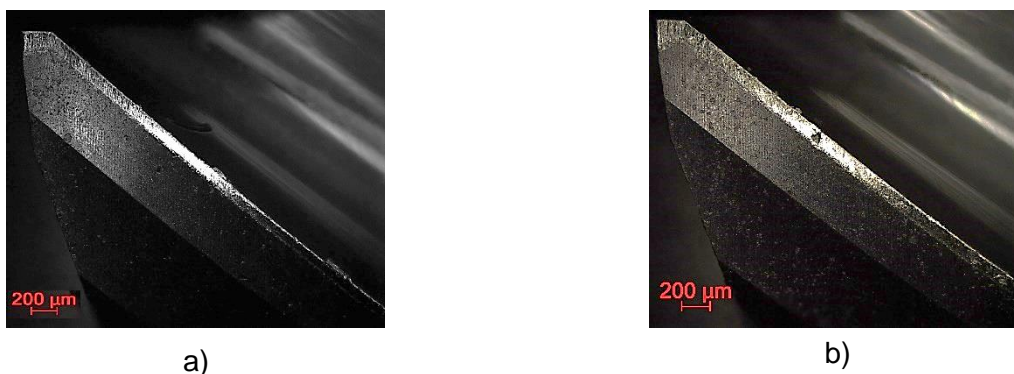
A kísérleti tervben felvázolt 17 beállítás eredménye az alábbi fejezetben kerül összegzésre.

3.1. Szerszám homlokoldal felőli alátámasztásának hatása a palástfelületem keletkező élek kopására

A korlátozott mennyiségű alapanyag és szerszám miatt nem volt lehetőségünk minden kísérlet előtt lépcsőt marni a munkadarabon, hogy tisztán palástmarás valósulhasson meg, ezért először azt vizsgáltuk meg, hogy van-e jelentősége annak, hogy a szerszám alá van-e támasztva homlokoldalról vagy sem. A $t_f=6s/t_h=3s_1$ nevű kísérlet esetén alá volt támasztva, a $t_f=6s/t_h=3s_2$ nevű kísérlet esetén nem volt alátámasztva a szerszám homlokfelülete a munkadarab által. Elméletileg ezen a szakaszon nem lehetett volna érintkezés a szerszám és a munkadarab között, azonban a nikkel ötvözetek hajlamosak a visszarugózásra [15], így előfordulhat, hogy a homlokfelületen lévő élek is forgácsolnak. A 4 él átlagos hátkopása a 2. ábrán, a szerszámokról készült felvételek 3. ábrán láthatók. Ezekon felvételeken mindig a legrosszabb állapotban levő élek kerültek bemutatásra. Látható, hogy lényeges különbség nincs annak hatására, hogy a szerszám homlok oldalról alá van-e támasztva vagy sem, így a további kísérletek során ezt a tényezőt már nem vettük figyelembe.



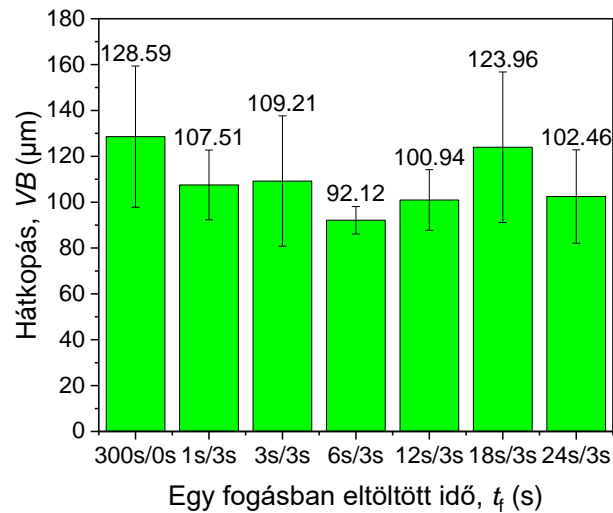
2. ábra: A szerszám alátámasztásának hatása a palástfelületen levő élek hátkopására



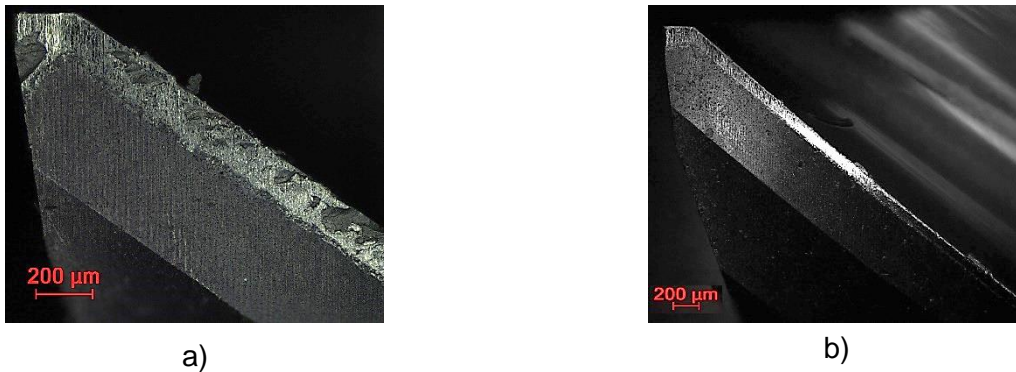
3. ábra: Szerszámkopás a) 6s/3s_1, b) 6s/3s_2 esetén

3.2. Az egy fogásban eltöltött idő nagyságának hatása a szerszámkopásra és a forgácsoló erőre

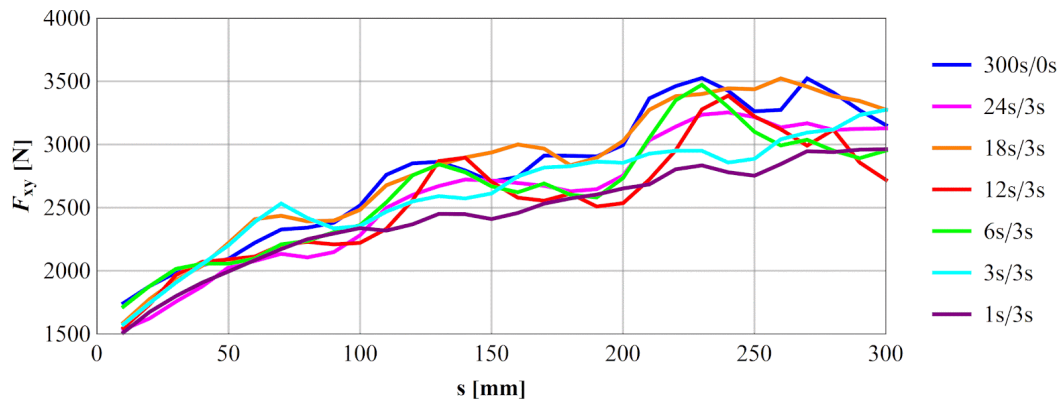
Az egy fogásban eltöltött idő nagyságának hatása a szerszám hátkopására és forgácsoló erőre a 4-6. ábrákon látható. A kiállás nélküli megmunkálás után mért hátkopáshoz képest minden esetben csökkent a hátkopás mértéke, mely szerint előnyös a forgácsolást bizonyos fogásban eltöltött idő után megszakítani. A legkisebb hátkopást azonos kiállási idő mellett a 6s egy fogásban eltöltött idő után tapasztaltuk, mely a kiállás nélkülinél mért hátkopáshoz képest 28%-os csökkenést jelent. Valamint a legkisebb szórás e kísérlet után mérhető, mely arra utal, hogy az élek ebben az esetben koptak egymáshoz képest a legegyszerűsebben. Minél nagyobb a szórás mértéke, annál inkább jellemző, hogy a szerszám élein és sarkain kipattogzás jelenik meg. A forgácsoló erő esetén a görbék között szignifikáns eltérés nem figyelhető meg, azonban a kopással összhangban a legnagyobb forgácsoló erő a kiállás nélküli palástmarás esetén figyelhető meg.



4. ábra: Egy fogásban eltöltött idő hatása a hátkopásra



5. ábra: Az egy fogásban eltöltött idő hatása a szerszámkopásra a) 300s/0s és b) 6s/3s esetén

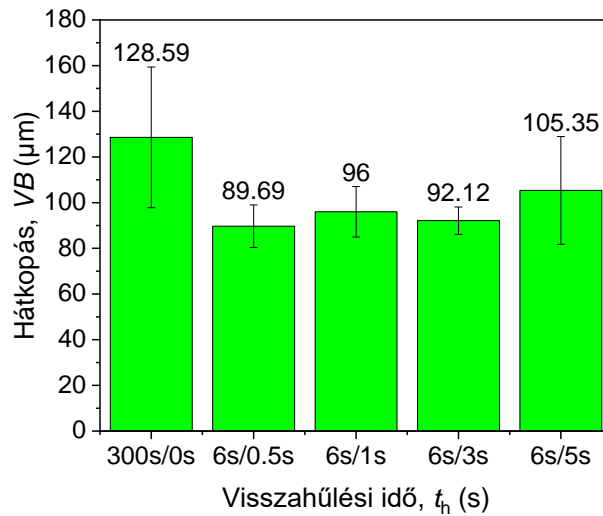


6. ábra: Az egy fogásban eltöltött idő hatása az F_{xy} forgácsoló erőre

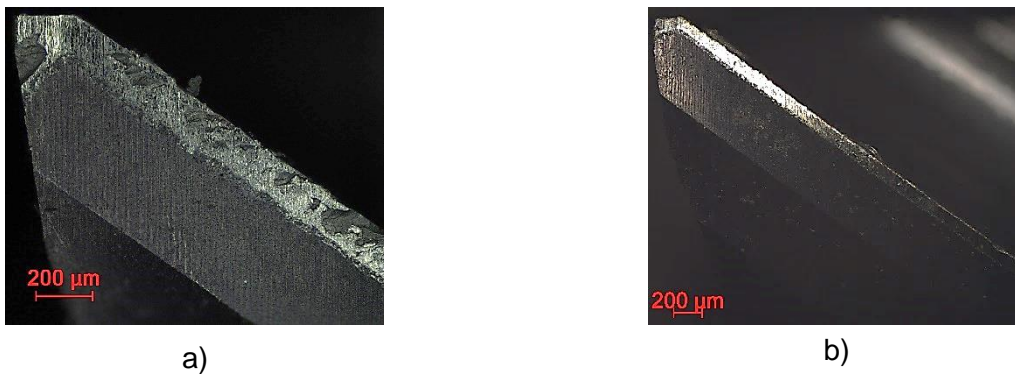
3.3. A visszahűlési idő nagyságának hatása a szerszámkopásra és a forgácsoló erőre

A visszahűlési idő nagyságának hatása a hátkopásra a 7-9. ábrákon láthatók. Megfigyelhető, hogy minél kisebb a visszahűlési idő, annál kisebb a 4 él kopásának átlaga. Ennek értelmében a legkisebb kopást 0,5s visszahűlési idővel történő megmunkálás után tapasztaltuk, mely a kiállás nélkülinél mérthez képest 30,25%-os javulást jelent. Ez annak köszönhető, hogy a szerszámnak ennyi hűlési idő elegendő, azonban ez idő alatt a forgácsolási zóna nem hűl ki teljesen, mely elősegíti forgácsleválasztást és vélhetően a ciklikus hőingadozás is kisebb mértékben terheli a szerszámot. A hátfelület kopási motívumai közül csak abrazív kopás figyelhető meg, kipattogzódás sem az éleken, sem a sarkokon nem látható. Ebben az esetben is elmondható, hogy a forgácsoló erő a

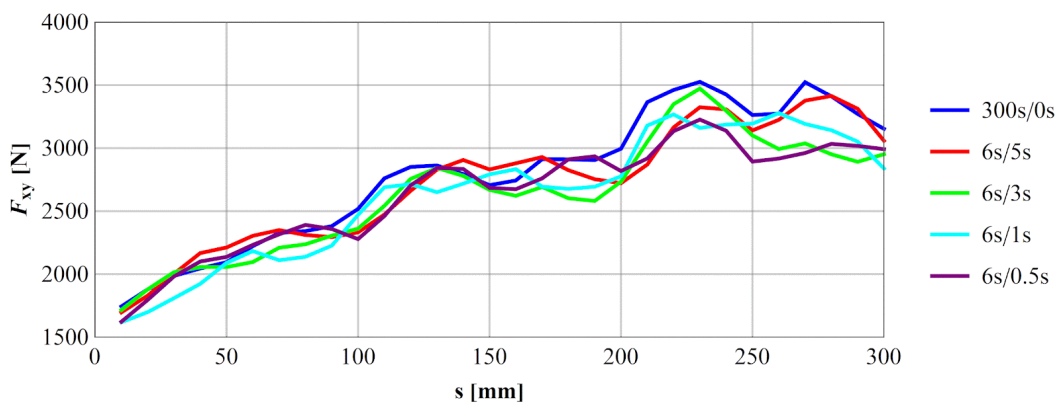
szerszámkopással korrelál, vagyis a legnagyobb forgácsoló erő a kiállás nélküli megmunkálás esetén volt mérhető, míg a legalacsonyabb a 0,5 s kiállás esetén.



7. ábra: Visszahúlési idő nagyságának hatása a hátkopásra



8. ábra: A visszahúlési idő hatása a szerszámkopásra a) 300s/0s és b) 6s/0,5s esetén

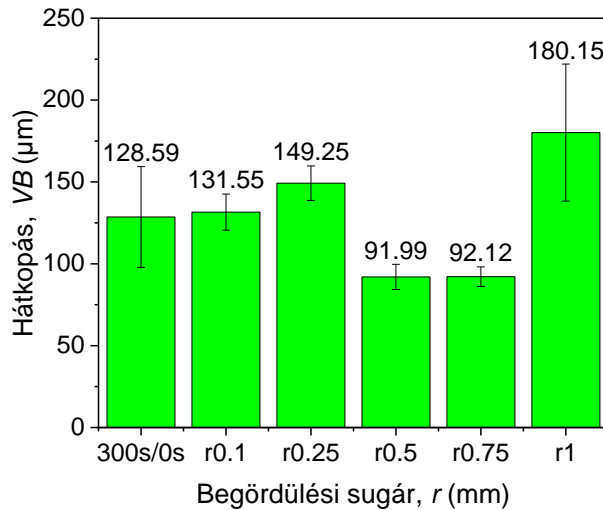


9. ábra: A visszahúlési idő hatása az F_{xy} forgácsoló erőre

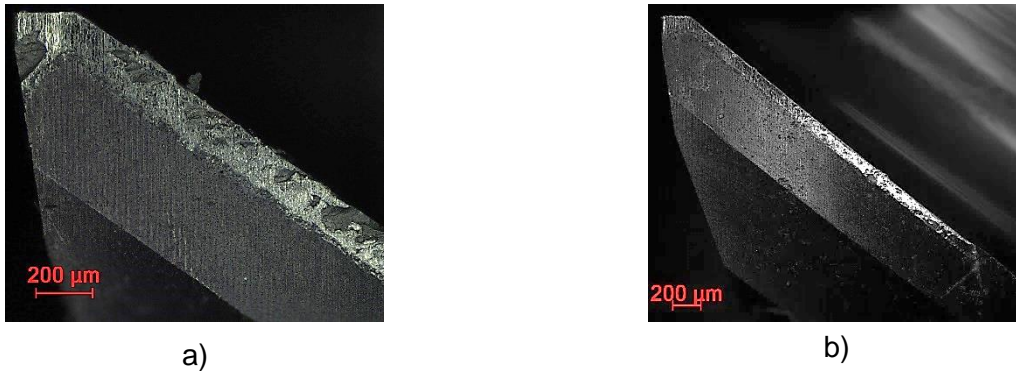
3.4. A begördülési sugár nagyságának hatása a szerszámkopásra és a forgácsoló erőre

Begördülési sugárnak nagyságának hatása a hátkopásra a 10-12. ábrákon figyelhető meg. A legjobb eredményt a 0,75 mm-es begördülési sugár esetén tapasztaltuk, melytől 0,5 mm-es begördülési sugárnál mért átlag hátkopás csupán 0,03 μm -rel kisebb, azonban az előbbi esetben kisebb a szórás nagysága, mely egyenletesebb kopást eredményez. Látható, hogy minden egyéb begördülési sugár esetén nagyobb az átlag hátkopás, mint a kiállás nélküli esetben. Kisebb begördülési sugár alkalmazásának hátránya abból adódhat, hogy belépésnél frontálisan találkozik

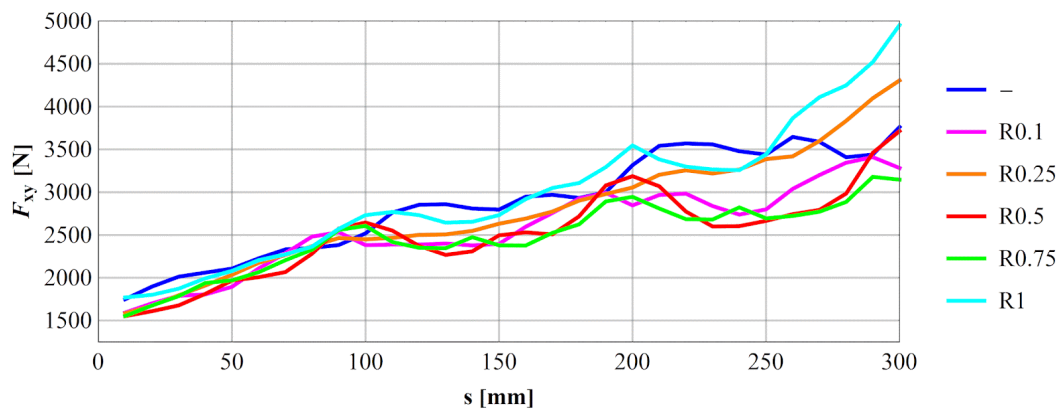
a szerszám a leválasztandó anyagmennyiséggel, akárcsak a lineáris horonymarás bekezdése esetén, még a nagyobb begördülési rádiuszok esetén a fogásba lépéskor egy elnyújtott átmeneti szakaszon vasalási jelenség valósul meg a minimális forgácsvastagság eléréséig. 0,5 és 0,75 mm-es begördülési sugár értékeken kívül a többi sugárértékkel történő megmunkálás során erősebb kopás és kipattogzódás figyelhető meg az élek és a sarkok mentén. A forgácsoló erő szintén korrelál a szerszámkopással. Megfigyelhető, hogy a 0,5 és 0,75 mm-es begördülési rádiusz esetén a legalacsonyabb a forgácsoló erő, 1 mm-es rádiusz esetén viszont szignifikánsan megnőtt a szerszám terhelése.



10. ábra: Begördülési sugár hatása a hátkopásra



11. ábra: A begördülési sugár hatása a szerszámkopásra a) 300s/0s és b) r0,5 esetén



12. ábra: A begördülési sugár hatása az F_{xy} forgácsoló erőre

4. Összegzés

Nikkel-bázisú szuperötvözet palástmarása során az egy fogásban eltöltött időnek, a visszahúlési időnek és a begördülés sugarának nagy hatása van a szerszám éltartamára. Az elvégzett kísérletek alapján az alábbi megállapítások fogalmazhatóak meg:

- ismétlések alapján megállapítható, hogy palástmarás esetén a szerszám elhasználódási folyamatára nincs jelentős hatása annak, hogy a szerszám homlokoldal felől alá van-e támasztva vagy sem;
- a kiállítás nélküli palástmarás után mért átlagos hátkopáshoz képest minden esetben csökkent az átlagos hátkopás és forgácsoló erő nagysága, ezáltal érdemes a forgácsolást bizonyos időközönként megszakítani. A vizsgált forgácsolási paraméterek mellett a legkisebb átlagos hátkopást azonos visszahúlési idő és begördülési sugár esetén 6s egy fogásban eltöltött idő esetén mértük;
- a visszahúlés idejének szignifikáns hatása van az átlagos hátkopásra. A vizsgált forgácsolási paraméterek mellett a legkisebb átlagos hátkopást és forgácsoló erőt a 0,5 s visszahúlési idővel történő megmunkálás eredményezte, mely alapján megállapítható, hogy a visszahúlési időt nem érdemes tovább növelni, mivel a forgácsolási zóna hőmérsékletének ingadozása túl nagyra válhat, mely negatív hatással van az éltartamra és a szerszámot terhelő erőre;
- kiállítások közötti ki- és begördülési sugárnak szintén jelentős hatása van az átlagos hátkopásra nézve. A vizsgált tartományon belül optimuma van, túl kicsi sugár esetén hirtelen nagy lesz a forgácsvastagság a fogásba lépéskor, még túl nagy rádiusz esetén vasalás valósul meg a fogásba lépéskor, mely az anyagban lévő fémkarbidok miatt erős koptató hatással van a szerszámra;
- a 4 él kopásának szórása arányos a tönkremenetel tendenciájával.

Köszönetnyilvánítás

Szeretnénk köszönetet mondani a Lovász Forgácsoló Kft.-nek, amiért a kutatáshoz szükséges szerszámokat biztosította.

Irodalomjegyzék

- [1] Kónya, G., Ficzer, P.: The Effect of Layer Thickness and Orientation of the Workpiece on the Micro- and Macrogeometric Properties and the Machining Time of the Part during 3D Printing, *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 2023, Vol. 67, No. 2, pp. 143-150, DOI: 10.3311/PPme.21473
- [2] Borbás, L., Hlinka, J., Ficzer, P.: Az újrakészítés paramétereinek vizsgálata a reverse engineering folyamat során, *GÉP*, 2024, Vol. 75, No. 1, pp. 23-26, DOI: 10.3311/GEP.2024.1.5
- [3] Kónya, G., Kovács, Z. F.: Experimental investigation of the effects of cooling-lubricating methods on the slot milling process of GTD-111 type nickel-based superalloy, *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, Vol. 119, pp. 98–108, DOI: 10.1016/j.jmapro.2024.03.074
- [4] Kónya, G., Kovács, Z. F.: The Comparison of Effects of Liquid Carbon Dioxide and Conventional Flood Cooling on the Machining Conditions During Milling of Nickel-based Superalloys, *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 2023, Vol. 67, No. 3, pp. 190-196, DOI: 10.3311/PPme.22265
- [5] Geier, N.: An experimental study on the drilling of CFRP sandwich structures with filled and unfilled aramid honeycomb cores, *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, 2023, Vol. 45, No. 4, p. 219, DOI: 10.1007/s40430-023-04138-5
- [6] Magyar, G., Geier, N., Analysis and modelling of thrust force in drilling of basalt and carbon fibre-reinforced polymer (BFRP and CFRP) composites, *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, Vol. 45, No. 6, p. 323, DOI: 10.1007/s40430-023-04241-7.
- [7] Malea, C.I.; Nițu, E.L.; Iordache, D.M.; Tabacu, Ș.L.; Negrea, A.D.; Bădulescu, C.: Analysis of Face Milling of Hard Steel 55NiCrMoV7 by Studying Rough and Semi-Finished Machining and the Influence of Cutting Parameters on Macroscopic Chip Dimensions, *Materials*, 2024, Vol. 17, p. 3434, DOI: 10.3390/ma17143434
- [8] Fait, D., Mašek, V., Čermák, R.: Using Digital Twins in Mechatronics and Manufacturing, in *2022 International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)*, 2022, pp. 434–438. DOI: 10.1109/ISMSIT56059.2022.9932840
- [9] Edl, I. M., Zdebor, J., Čermák, R.: The management of data flow manufacturing object for information system of industry 4.0, in *Збірник тез доповідей Міжнародної науково-технічної інтернет-конференції «Гідро-та пневмоприводи машин—сучасні досягнення та застосування»*, 2018, pp. 134-136,
- [10] Singh, A., Ghosh, S., Aravindan, S.: State of art for sustainable machining of nickel-based alloys using coated and uncoated tools and machining of high strength materials using surface modified cutting tools, *Tribology International*, 2022, Vol. 170, p. 107517, DOI: 10.1016/j.triboint.2022.107517

- [11] Pimenov, D. Y. et al.: Improvement of machinability of Ti and its alloys using cooling-lubrication techniques: a review and future prospect, *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, Vol. 11, pp. 719–753, DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.01.031.
- [12] Gupta, M. K., et al.: Parametric optimization and process capability analysis for machining of nickel-based superalloy, *Int J Adv Manuf Technol*, 2019, Vol. 102, No. 9, pp. 3995–4009, DOI: 10.1007/s00170-019-03453-3
- [13] Li, Q., Gong, Y., Sun, Y., Liu, Y., Liang, C.: Milling performance optimization of DD5 Ni-based single-crystal superalloy, *Int J Adv Manuf Technol*, 2018, Vol. 94, No. 5, pp. 2875–2894, DOI: 10.1007/s00170-017-0999-1
- [14] Altas, E., Karatas, M. A., Gokkaya, H., Akinay, Y.: Surface Integrity of NiTi Shape Memory Alloy in Milling with Cryogenic Heat Treated Cutting Tools under Different Cutting Conditions, *J. of Materi Eng and Perform*, 2021, Vol. 30, No. 12, pp. 9426–9439, DOI: 10.1007/s11665-021-06095-3
- [15] Wang, F., Wang, Y.: Comparison of cryogenic cooling strategy effects on machinability of milling nickel-based alloy, *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, Vol. 66, pp. 623–635, DOI: 10.1016/j.jmappro.2021.04.050