

NIKKEL-BÁZISÚ SZUPERÖTVÖZETEK FORGÁCSOLHATÓSÁGÁNAK PROBLÉMAKÖRE

PROBLEMS OF MACHINABILITY OF NICKEL-BASED SUPERALLOYS

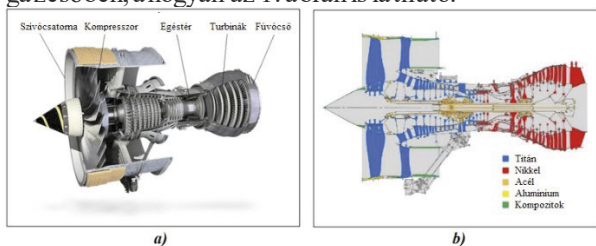
Kónya Gábor*, Kovács Zsolt Ferenc**

ABSTRACT

In this paper, the problems of machinability of nickel-based superalloys are discussed, why machinability of these materials is so difficult, and the importance of R&D for industry. These superalloys are some of the most difficult materials to machine and are widely used as raw materials for gas turbines in the aerospace and energy industries. Based on the industry experience, slot milling causes the biggest problem, tool wear quickly and breakages are common. Due to the high thermal strength and hardness, the cutting zone is subjected to high shear stresses, resulting in increased cutting forces and cutting temperatures, which will also stress the tool edge due to the extremely poor thermal conductivity of the material. In this paper, we will briefly summarize why the machinability of these materials is so difficult, which data influences on tool life. Based on our research, we presented the effects of tool paths and cooling-lubricating processes on the cutting tool life.

1. BEVEZETÉS

A Nikkel-bázisú szuperötvözeteket elsősorban a repülőgép- és energetikai iparban használják gázturbinák alapanyagaként [1], főként a magas hőmérsékletű részekben, mint például az égéstérben, a turbinában és a gázcsőben, a hogyan az 1. ábrán is látható.



1. ábra Rolls-Royce Trent 800 típusú gázturбина a) egyes részegységei [6], b) teljes metszete és a részegységeknél felhasznált alapanyagok [7]

Üzemelésük során jellemző az 1400-1500 °C-os üzemi hőmérséklet [2], akár 40 bar nyomáson [3] extrém korrózív környezetben, mindeközben az üzemi

fordulatszámuk a 10 000 1/percet is meghaladja [4]. Ez a magas üzemi hőmérséklet a gázturbinák hatásfokának növeléséhez szükséges, hiszen a hatásfok növelése a többi hőerőgéphez hasonlóan úgy lehetséges, hogy a munkaközeg maximum-és minimum hőmérséklete közti különbséget növeljük. A ma használatos gázturbinák hatásfoka megközelíti a 60%-ot [5].

Az alkalmazási területből adódóan a szuperötvözetekkel szemben támasztott követelmények közé tartozik a nagy melegszilárdság, a nagy keménység, a hő-és korrózióállósággal szembeni ellenálló képesség. Ezen tulajdonságaik miatt a különösen nehezen megmunkálható anyagok közé tartoznak, azonban a belőlük készült alkatrészek zömét mégis forgácsolással állítják elő [8]. Kutatásaink során a GTD-111, speciális vákuumöntéssel előállított Ni-bázisú szuperötvözet forgácsolhatóságával foglalkozunk. Megmunkálhatósága lényegesen rosszabb, mint az általánosságban vizsgált, széles körben ismert és elérhető Inconel 718-é. Az 1. táblázatban a GTD-111, az Inconel 718 és a referencia anyagként általánosan elfogadott C45 mechanikai- és fizikai tulajdonságainak összehasonlítása látható. A feltüntetett adatok alapján megállapítható, hogy a GTD-111 forgácsolása lényegesen nehezebb feladat, mint az Inconel 718-é. Összehasonlítva a C45-tel látható, hogy a szuperötvözetek megmunkálása miért oly nehéz feladat.

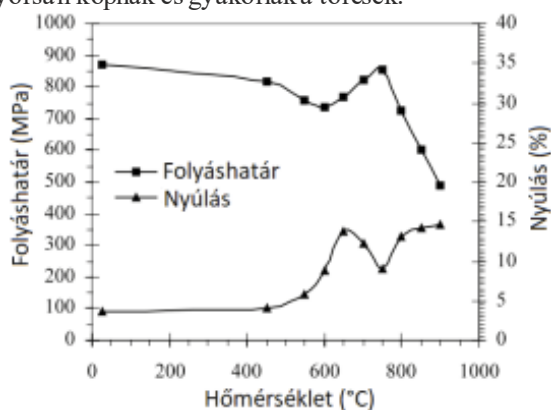
1. táblázat GTD-111, Inconel 718 és C45 mechanikai- és fizikai tulajdonságai [9] [10]

	GTD-111	Inconel 718	C45
Szakítószilárdság, R_m (MPa)	1310	965	610
Keménység, (HRC)	41,4	36	-
Keménység, (HB)	-	-	230
Nyúlás, A_5 (%)	8	12	16
Sűrűség, ρ (kg/m ³)	8000	8240	7700
Hővezetőképesség, λ (W/m·K)	12,56	11,2	45,35

* tanársegéd, Neumann János Egyetem, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék

** egyetemi docens, Neumann János Egyetem, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék

A GTD-111 folyáshatárának és nyúlásának hőmérsékletfüggése a 2. ábrán figyelhető meg. Látható, hogy tulajdonságaikat nagyon magas hőmérsékleten is megtartják, emiatt válnak oly nehezen forgácsolhatóvá, mert a nagy szilárdságnak és keménységnek köszönhetően nagy nyíróerők ébrednek a forgácsolási zónában, valamint a megmunkálás során keletkező nagy hőmérséklet a rendkívül rossz hővezető képesség miatt nem tud a forgácsba és a munkadarabba távozni, ennek következtében a szerszám élén fog koncentrálni. Ennek eredményeképpen a forgácsoló szerszámok gyorsan kopnak és gyakoriak a törések.



2. ábra GTD-111 folyáshatárának és nyúlásának hőmérsékletfüggése [11]

Az egyes anyagtulajdonságokból származó megmunkálási problémákat a 3. ábra szemlélteti.

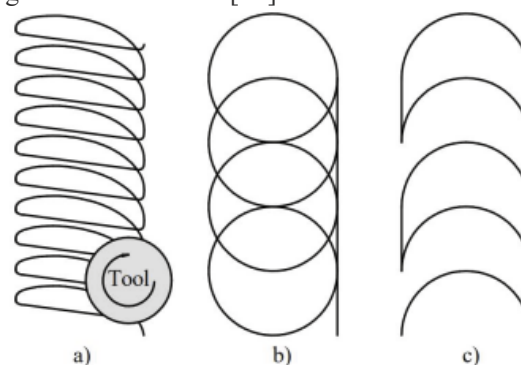


3. ábra Anyagtulajdonságok befolyásolása a megmunkálási problémákra [12]

2. HORONYMARÁSI STRATÉGIÁK HATÁSAINAK VIZSGÁLATA

E kutatás során GTD-111 szuperötvözetet forgácsoltak három trochoidális szerszám pályával: **i)** az Autodesk Inventor HSM® a adaptív-, **ii)** a körkörös- és **iii)** a Szalki és társai által is vizsgált lengő inga [13] stratégiák (4.

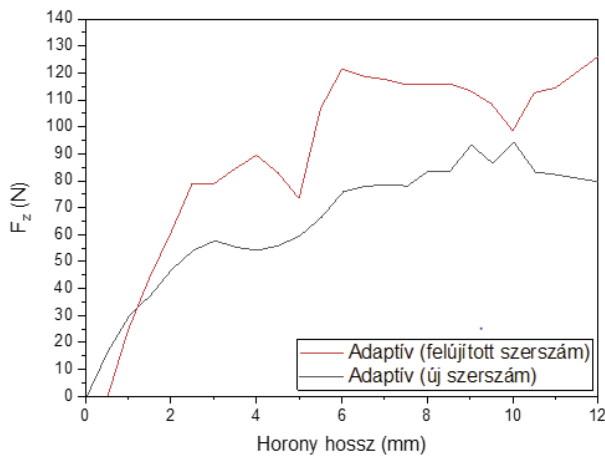
ábra) hatásait vizsgáltuk a forgácsoló erők- és nyomatékokra, a szerszámkopásra és a megmunkált felület érdességére nézve. Az alkalmazott technológiai paraméterek a következők voltak, a forgácsoló sebesség $v_c = 19$ m/perc, a fogankénti előtolás $f_z = 0,02$ mm/fog, a radiális fogásvétel $a_e = 0,2$ mm volt. Mindegyik stratégia esetén 1 db új és 1 db újraélezett és egyúttal újra bevonatolt Walter Proto maxTMST H4038217-8-1 típusú, 8 mm átmérőjű 4 élű tömör keményfém szerszámot használtak, TiN bevonattal. A horony hossza és szélessége 12 mm, míg a mélysége 8 mm, melyet egy fogásban munkáltak ki [14].



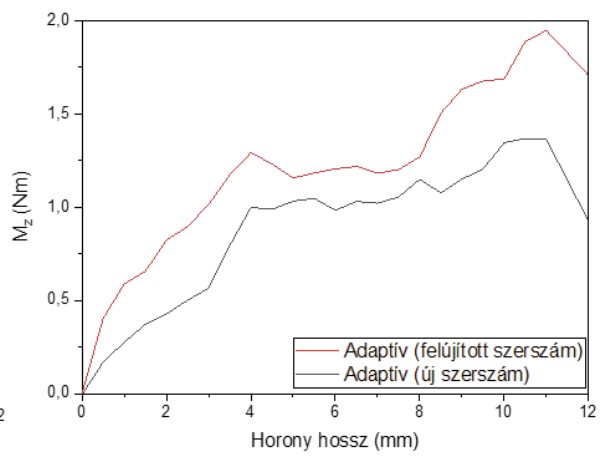
4. ábra Használt trochoidális szerszám pályák: a) adaptív, b) körkörös, c) lengő [14]

Az új- és felújított szerszámok teljesítőképességének vizsgálata azért fontos, mert az iparban nagyon sok esetben használnak felújított szerszámokat a költségcsökkentés érdekében. A felújítás összege körülbelül a negyede az új szerszám árának. Általánosságban elmondható, hogy az új szerszámokkal történő megmunkálások során aacsonyabb szerszámterhelés figyelhető meg, mint a felújított társaiknál, azonban a lengő stratégia esetén a felújított szerszám bizonyult jobbnak. Ez annak köszönhető, hogy megmunkálás előtt megvizsgálva a szerszámokat azt látni, hogy a köszörülés során mindegyik esetben máshogy néz ki a szerszámgeometria, az eredeti geometriát egyik szerszám esetében sem sikerült tartani, így ebben az esetben valószínűleg a felújított szerszámnak jobb geometriát sikerült beköszörülni, mint amilyen az új szerszámé volt [14].

Stratégiákat összehasonlítva a legkedvezőbb szerszámterhelést az adaptív stratégiát használva kaphatjuk, a legrosszabbat pedig a lengő stratégiaival. Ez annak köszönhető, hogy az adaptív stratégia igyekszik a kontaktszöveget állandó értéken tartani a teljes megmunkálás során és nem tartalmaz éles irányváltásokat vagy frontális fogásvételeket, mint a másik két stratégia, ahol a fogásvétel egy egyenes mentén történik és nem egy ív mentén gördül be a szerszám [14]. Ezzel a technológiával a szerszámot terhelő dinamikus igénybevételek nagy mértékben csökkenthetők [14]. A szerszámokról készült felvételek a 8-10. ábrán figyelhető meg.

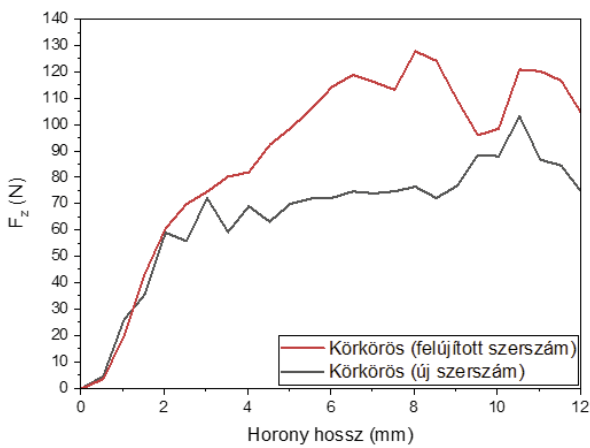


a)

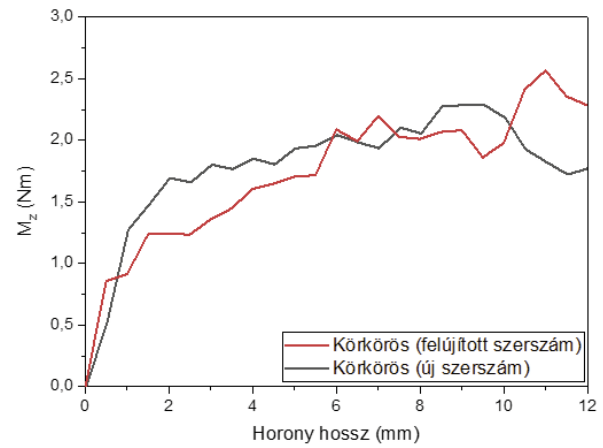


b)

5. ábra Forgácsoló a) erő és b) nyomaték alakulása a megmunkált horonyhossz függvényében adaptív stratégia esetén [14]

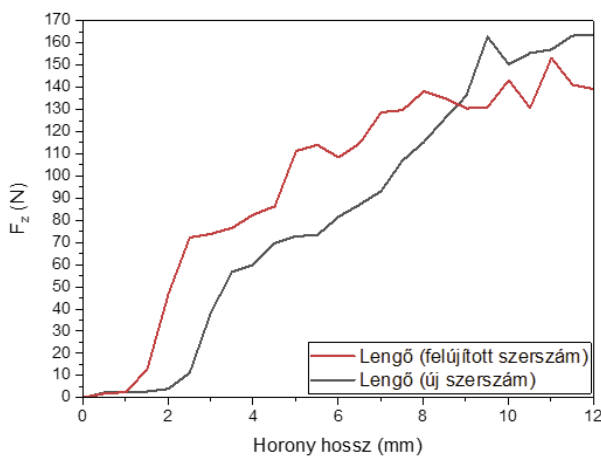


a)

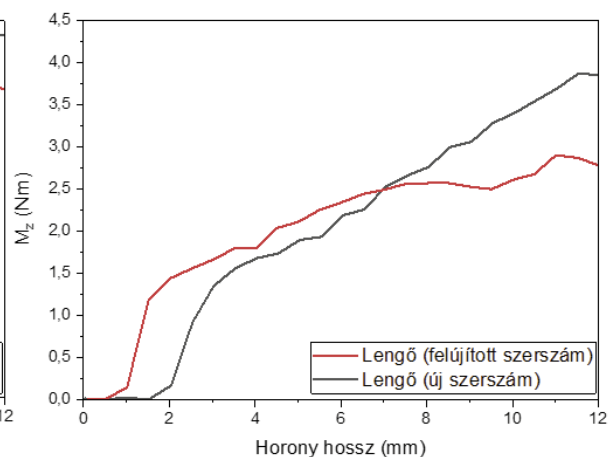


b)

6. ábra Forgácsoló a) erő és b) nyomaték alakulása a megmunkált horonyhossz függvényében körkörös stratégia esetén [14]



a)



b)

7. ábra Forgácsoló a) erő és b) nyomaték alakulása a megmunkált horonyhossz függvényében lengő stratégia esetén [14]



8. ábra Új- és felújított szerszámok adaptív stratégiával történt marás után [14]



9. ábra Új- és felújított szerszámok körkörös stratégiával történt marás után [14]

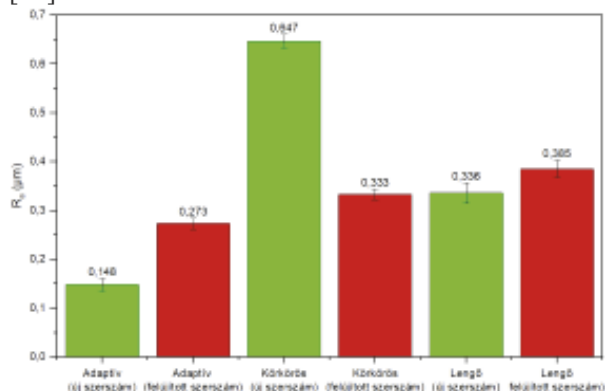


10. ábra Új- és felújított szerszámok lengő stratégiával történt marás után [14]

8-10. ábrán látható felvételeken megfigyelhető, hogy a szerszám kopásának mértéke megegyezik a szerszámterhelés mértékével. A legkisebb kopás azokon a szerszámokon figyelhető meg, melyek adaptív stratégiával voltak használva. Általánosságban elmondható, hogy az új szerszámok kisebb kopást mutatnak, mint a felújított szerszámok. Azonban érdemes megjegyezni, hogy a körkörös stratégia esetén az új szerszámon nagyobb kopás figyelhető meg, mint a felújított szerszámon, ez a megmunkált felületen is észrevehető, ahogyan a 11. ábrán látható. A legnagyobb szerszámkopás a lengő stratégiánál használt szerszámokon figyelhető meg, ami a szerszám pályán (4. ábra, c)) látható irányváltásoknak köszönhető [14].

Ahogyan a 11. ábrán látható, a legjobb felületi érdességet az adaptív stratégia, majd ezt követte a körkörös, míg a legrosszabbat a lengő stratégia eredményezte. Ez a stratégiákból eredő irányváltásokkal és azok mértékével van összefüggésben. A frontális fogásvétel szintén nagy rezgést generál a szerszámban, mely mindenképprontja a felület érdességét. A körkörös stratégia esetén azonban a felújított szerszám jobb felületi érdességet eredményezett, mint az új szerszám [14]. A szerszám szemszögéből nézve a szerszám homlokfelületén lévő éleknek van hatása a horony talp felületének érdességére. Ezt a nagy mértékű romlást

ezen élek letörése vagy nagymértékű kopása okozhatta [14].



11. ábra Az egyes stratégiákkal és szerszám típusokkal történt marás után mért átlagos felületi érdességek [14]

Valamennyi horony esetén megfigyelhető, hogy a mérettartás rendkívül rossz volt. A 12 mm horony hosszon 0,3...0,4 mm-t is szűkült a horony. Ez azért jelent problémát, mert a horony simításakor a leválasztandó forgácsolási keresztmetszet folyamatosan nőni fog, mely a megmunkálás biztonságát és minőségét veszélyeztetheti. A szerszám ily mértékben nem kopott, hogy a mérettartás ilyen rossz legyen. Ez annak köszönhető, hogy a szerszámból és a munkadarabból a dózódnak nagyon kis fogankénti előtolással (0,01...0,02 mm) lehet dolgozni, miközben a keményfém szerszámok élrádiusza ($\rho_B \approx 0,005 \dots 0,008$ mm) bevonattal együtt, bevonat nélkül a ($\rho_B \approx 0,002 \dots 0,003$ mm) szokott lenni. Így lényegében a szerszám éle nem tud behatolni az anyagba, hanem a nagyobb élrádiusz miatt először sűrűlódik, majd képlékeny deformációt okoz a megmunkálandó felületen, majd csak kisebb anyagmennyiséget fog leforgácsolni, miközben vasalási jelenség figyelhető meg a forgácsolási folyamat során. Ennek következtében az eredetileg tervezett anyagleválasztási mélység nem valósul meg, mely eredményeképpen rossz a mérettartás. Erre a problémára megoldás lehet egy olyan szerszám pálya megalkotása, mely figyelembe veszi ezt a jelenséget és folyamatosan növeli a szerszám pálya hurokát mértékét vagy adaptívan változtatja a fogankénti előtolást.

3. HŰTÉS-KENÉSI ELJÁRÁSOK HATÁSAINAK VIZSGÁLATA

A nehezen forgácsolható fémötvözetek kapcsán új kutatási terület kezd kialakulni, nevezetesen a kriogénhűtéssel segített forgácsolás. E témában kutatók úgy gondolják, hogy a hagyományos hűtő-kenő eljárások nem nyújtanak kellő hűtőhatást a szerszámra nézve, melyek a magas hőmérséklet miatt korán tönkremennek. A kriogenika nagyon alacsony hőmérsékleten végbemenő fizikai jelenségek előállításával és

alkalmazásával foglalkozó tudományág. A kriogén hőmérséklet az alkalmazott közegtől függően 0 K (-273 °C) és 243 K (-30 °C) közötti tartományban helyezkedik el, ez határozottan a lacsonyabb hőmérsékletet jelent, mint a hétköznapi folyamatok során tapasztaltak. Az ilyen alacsony hőmérsékletek az anyagjellemzőkre is hatással vannak, többek között: a hővezető képességre, az elektromos ellenállásra, a képlékenységre és a szilárdságra is [15].

A kriogén hűtési eljárást az élet számos területén alkalmazzák, mint például az autók [16] - és repülőgépiparban [17]. A kriogén hűtési eljárás két fő megoldásként jelenik meg ezen ötvözetek forgácsolásában, egyrészt hőkezeli a forgácsoló szerszámokat megmunkálás előtt, ezzel növelve a szerszám éltartamát, másrészt hűtőközegként juttatják oda a forgácsolási zónába [18].

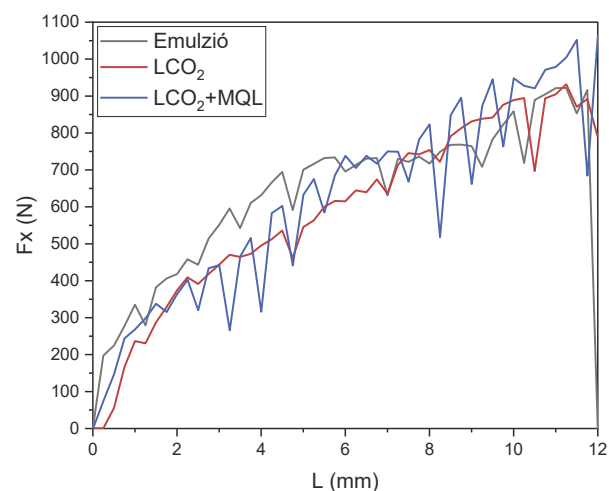
Leggyakrabban használt közegek a CO₂ és az LN₂ [19], azonban számos más közeg is alkalmaznak, min például argont, hidrogént, neont, héliumot és etánt [20]. Ezen közegeknek mindnek más-más a forráspontja. A forgácsolás technológia kapcsán a folyékony nitrogént (LN₂) és szén-dioxidot (CO₂) szoktak használni. A folyékony nitrogén forráspontja -196 °C, míg -210 °C-on válik szilárd halmazállapotúvá, ezért is nevezik (DCT – Deep Cryogenic Treatment) mélykriogén kezelésnek a folyamatot, mikor a nitrogént használják [21]. Ezzel szemben a CO₂ használata esetén egy jóval magasabb hőmérsékleten jön létre a kezelés, -78,5 °C-on, amit sekély kriogén kezelésnek neveznek (SCT – Shallow Cryogenic Treatment) [22]. Ennek az eljárásnak a jellegzetessége, hogy mikor a folyékony CO₂ elhagyja a fúvókát, és a hőmérséklet lecsökken, akkor szilárd- és gázformájú fázissá alakul át, ami egyrészt kedvező abból a szempontból, hogy egy vékony film réteget hoz létre a munkadarab-és a szerszám felülete között, azonban körülményes abból a szempontból, hogy a fúvóka kiáramló keresztmetszetét eldugíthatja [21].

Ezért teszteltük a folyékony szén-dioxiddal (LCO₂), az LCO₂+MQL (Minimal Quantity Lubrication) kombinációval történő hűtést GTD-111 típusú Nikkelbázisú szuperötvözet forgácsolásakor és a kapott eredményeket összehasonlítottuk az emulziós hűtés során kapott eredményekkel. A kísérletek során minden esetben 12 mm hosszú, 10 mm mély és 12 mm széles hornyokat munkáltunk meg egy fogásban $v_c = 28$ m/perc forgácsoló sebességgel, $f_z = 0,01$ mm/fog fogankénti előtolással. Az oldallépés mértéke $a_e = 0,8$ mm volt. A kísérletek során Jacsó Ádám állandó kontaktszögét biztosító szerszám pályáját [23] használtuk 8 mm átmérőjű, 5 élű tömör keményfém szerszámokkal [24]. A kutatás során vizsgáltuk a hűtés-kenési eljárások hatását a munkadarabra ható forgácsoló erőre, a szerszámkopásra, a forgácsolásra és a megmunkált felület érdességére

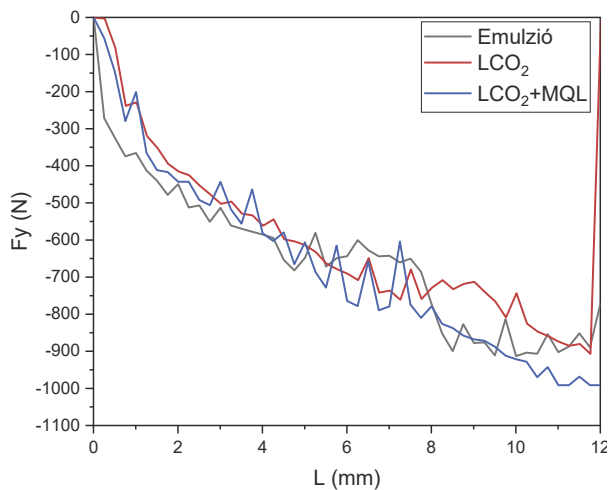
A munkadarabra ható erőkomponensek az egyes hűtő-kenési eljárások esetén a 12-14. ábrán láthatók. Az X- és Y-irányú erőknél a 12. és 13. ábrán megfigyelhető, hogy emulziós hűtésnél a megmunkálási hossz első felében nagyobb erő értékek voltak jellemzők a másik két hűtési módhoz képest. Ez a jelenség a maró hossz második felében változott és a folyékony szén-dioxidos hűtésnél mért értékekhez közelített, néhol alatta volt. A legnagyobb kilengéseket az LCO₂ és minimálkenés együttes alkalmazása hozta helyenként több, mint 150N-nal kisebb erőt mértünk a sima folyékony széndioxidos hűtésnél mérthez képest, azonban a horonymarás végső szakaszában itt figyelhető meg a legnagyobb 1050 N-os erőérték. A három görbét összevetve az LCO₂-es hűtés esetében volt a legegyszerűsebb a terhelés felfutása, kisebb kilengések láthatók a diagramokon.

A Z-irányban fellépő erőknél (14. ábra) látható, hogy a folyékony szén-dioxidos és LCO₂+MQL hűtésnél pozitív irányú erők voltak jellemzők, ezzel szemben emulziós hűtésnél negatív irányúak. A két pozitív irányú görbét összehasonlítva megfigyelhető, hogy a megmunkálás közel teljes hosszában kedvezőbbnek bizonyult a minimálkenés alkalmazása. Ennél a hűtési módnál rendre 100 N-nal kevesebb értékeket mértünk a sima LCO₂-s hűtéshez képest. Az emulziós hűtés és a folyékony széndioxidos esetben mért erők, habár ellentétesek azok hasonló tendenciával változnak és közel azonos értékeket vesznek fel, utóbbinál kissé nagyobb kilengésekkel. A Z-irányú erőknél egyértelműen megállapítható, hogy az LCO₂+MQL hűtési mód volt a legkedvezőbb.

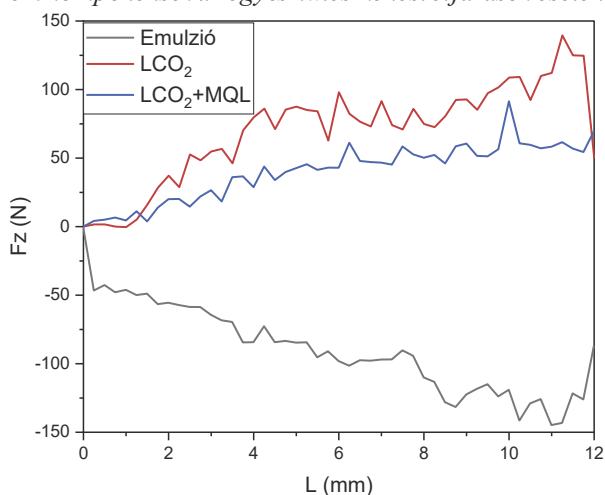
Ezek a tendenciák arra engednek következtetni, hogy az LCO₂ és LCO₂+MQL eljárásoknál olyan a terhelés jellege, mintha a szerszám nyomná a munkadarabot, míg emulziós hűtés esetén a jelenség viszont olyan, mintha a szerszám a munkadarabot felakarná tépni a megfogás alól, mert ebben az esetben nehezebbé válik a forgácsolás elvégzése és a maró spiráljával nagyobb húzóerőt fejt ki.



12. ábra A munkadarabra ható X-irányú erőkomponensek az egyes hűtés-kenési eljárások esetén



13. ábra A munkadarabra ható Y-irányú erőkomponensek az egyes hűtés-kenési eljárások esetén

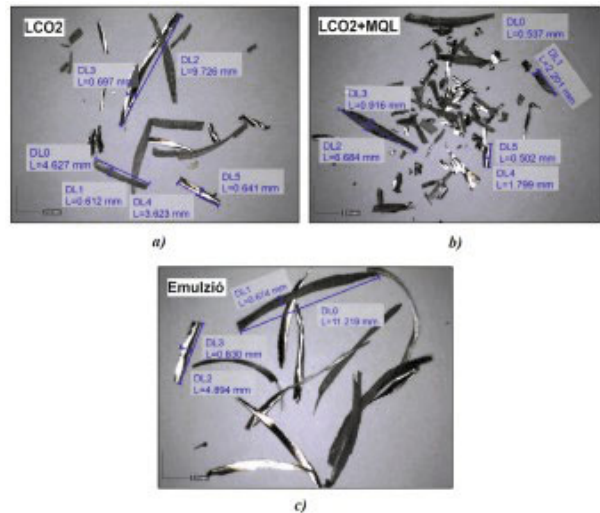


14. ábra A munkadarabra ható Z-irányú erőkomponensek az egyes hűtés-kenési eljárások esetén

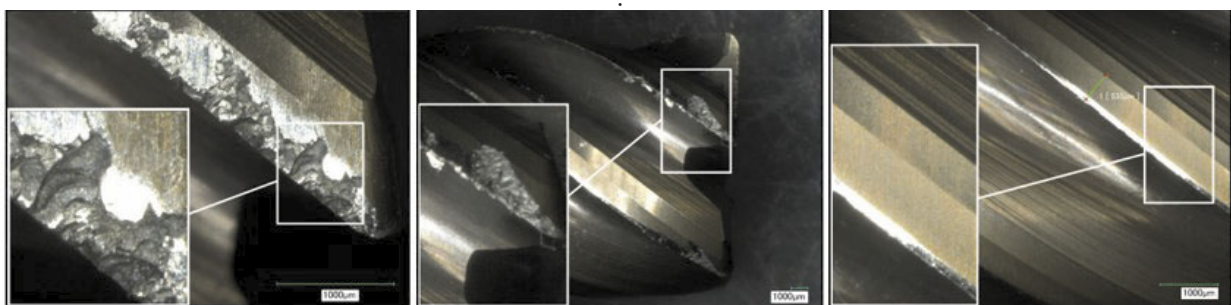
A forgácsoló szerszámkopásokról készült mikroszkópi felvételek a 15. ábrán láthatók

A szerszámokat megtekintve látható, hogy a legnagyobb tönkremenetel az LCO₂ hűtés esetén történt, itt lényegében leszakadt az él a megmunkálás során. Az LCO₂+MQL kombináció során már lényegesen jobb a szerszám állapota, itt nagyobb kipattogzás és sarkoknál figyelhető meg. Ez annak az eredménye, hogy nem biztos, hogy az olaj eljutott a maró végéhez, vagy ha eljutott, akkor feltehető, hogy az olajrészecskék megfagytak és lepattoztak a szerszám éléről. A legjobb állapotban az emulziós hűtés során maradt a szerszám, ebben az esetben a forgácsolási zónában az élszakaszon az élradius növekedése megfigyelhető. A kísérlet sorozat eredményeiből arra lehet következtetni, hogy a kenésnek nagyobb hatása lehet a szerszámélettartamra, mint a hűtésnek. Ennek a megerősítésére további vizsgálatok szükségesek.

A forgácsolási kísérletek során keletkezett forgácsok a 16. ábrán láthatók.



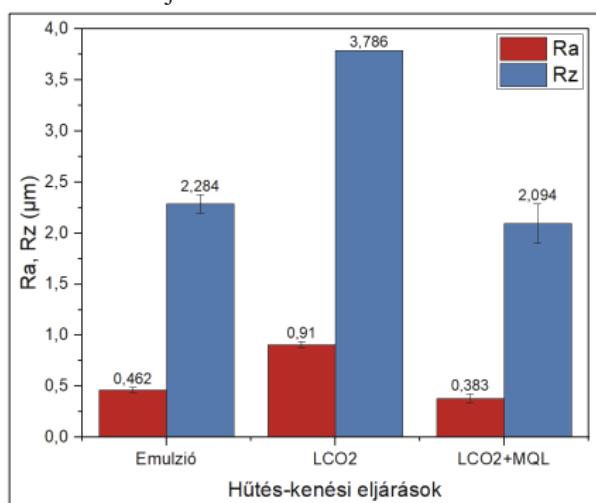
16. ábra Forgácsolási kísérletek során keletkezett forgácsok
a) LCO₂; b) LCO₂+MQL és c) Emulzió esetén



15. ábra Szerszámkopás jellegzetességei az egyes hűtés-kenési eljárások esetén
a) LCO₂; b) LCO₂+MQL; c) emulzió esetén

LCO₂ hűtésnél jellemzően 3...10 mm hosszúságú és 0,5...0,7 mm közelítő átmérőjű forgácsokat figyeltünk meg, elvélve találtunk kisebb darabokat. Ezzel szemben a folyékony szén-dioxid és minimálkenés együttes alkalmazásánál jelentősen jobb volt a forgácstörés, a forgácsok közelítő átmérője hasonló volt az előzőkhöz, azonban azok nagyobb részének hosszúsága jellemzően ~ 2 mm volt, számos kisebb darab is észlelhető volt, ami valószínűleg kapcsolatban van a ferde élű szerszám kisebb belépő élszakaszával. Emulziós hűtésnél a sima LCO₂-höz hasonló, bár azoknál hosszabb forgácsok jelentek meg. Az eredmények alapján megállapítható, hogy forgácstörés szempontjából az LCO₂+MQL hűtés-kenés volt a legjobb.

A hornyok talpfelületén mért felületi érdesség az egyes hűtés-kenési eljárások esetén a 17. ábrán látható



17. ábra A megmunkált hornyok talpfelületeinek átlagos felületi érdessége és érdességmagassága az egyes hűtés-kenési eljárások esetén

Mindhárom horony esetében háromszor végeztük el az érdességmérést és a kapott eredmények átlagát ábráztuk azok szórásaival. A diagramon látható, hogy a legjobb R_a és R_z értékeket LCO₂+MQL hűtő-kenő eljárás alkalmazásával sikerült elérni, ehhez közelítettek az emulziós hűtésnél tapasztaltak. A mért átlagos felületi érdesség és érdességmagasság értékek folyékony szén-dioxidos hűtés esetében voltak a legrosszabbak. Az eredmények alapján megállapítható, hogy a kenésnek kiemelt szerepe van a horonymarás során, továbbá az LCO₂ hűtést minimálkenéssel kiegészítve jelentős javulás érhető el az emulziós hűtéshez képest is.

4. ÖSSZEGZÉS

Jelen publikációban bemutatásra került a Nikkel-bázisú szuperötvözetek megmunkálhatóságának problémaköre, s hogy miért oly nehezen forgácsolhatók ezek az anyagok. Ismertettük, mely tényezők vannak hatással a szerszáméltartamra, melyek közül kettőnek, a

szerszám pályáknak és a hűtés-kenési eljárásoknak hatásait saját kutatási példákön keresztül mutattuk be és vázoltuk a továbbfejlesztési lehetőségeket.

5. IRODALOM

- [1] Antolovich S. D.: Microstructural aspects of fatigue in Ni-base superalloys, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol. 373, No. 2038, (2015), doi:10.1098/RSTA.2014.0128
- [2] Pollock T. M., Tin S.: Nickel-Based Superalloys for Advanced Turbine Engines: Chemistry, Microstructure and Properties, *Journal of propulsion and power*, Vol. 22, No. 2, (2012), pp. 361–374, doi:10.2514/1.18239
- [3] Olufayo O. A., Boulaares M. D., Songmene V.: Machining/machinability of Rene 65 superalloy for aerospace applications, in *Proceedings of 2020 IEEE 11th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies*, Capetown, South Africa, 2020, pp. 1–7.
- [4] Ulutan D., Ozel T.: Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review, *International Journal Machine Tools and Manufacture*, Vol. 51, No. 3, (2011), pp. 250–280, doi: 10.1016/J.IJMACHTOOLS.2010.11.003.
- [5] CNC: Szuperötvözetek egykristályok – drágakövek a gázturbinákban, [online] Elérhető: <https://www.cnc.hu/2014/01/szuperotvoret-egykrystalok-dragakovek-a-gaszturbinakban> [Elérés dátuma: 2023. 02. 14]
- [6] Rolls-Royce: Trent 800, [online] Elérhető: <https://www.rolls-royce.com/products-and-services/civil-aerospace/widebody/trent-800.aspx#/> [Elérés dátuma: 2023. 02. 14.]
- [7] Rolls-Royce: The Rolls-Royce Trent Engine, [online] Elérhető: <https://slideplayer.com/slide/1603994/> [Elérés dátuma: 2023. 02. 14.]
- [8] Kodácsy J., Kovács Zs. F., Viharos Zs. J.: A Ni-BÁZISÚ SZUPERÖTVÖZETEK MEGMUNKÁLHATÓSÁGA HORONYMARÁSKOR, *Gradus*, Vol. 2, No. 2, (2015) pp. 142–146,
- [9] Kodácsy J., Viharos Zs. J., Kovács Zs. F.: A forgácsolhatóság meghatározásának módszerei Ni-bázisú szuperötvözetek horonymaráskor, *Gradus*, Vol. 15. No. 2, (2015) pp. 125-129,
- [10] Zhang B.-Y., Zeng Y.-N., Pang X.-Q., Li S.-Q., Liu X., Deng W.-J.: Feasibility analysis and process characteristics of selective laser ablation assisted milling Inconel 718, *Advances in Manufacturing*, Vol. 10, No. 4, (2022), pp. 495-519, doi:10.1007/s40436-021-00384-9

- [11] Sajjadi S. A., Nategh S., Guthrie R. I. L.: Study of microstructure and mechanical properties of high performance Ni-base superalloy GTD-111, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 325, No. 1-2, (2002) pp. 484–489, doi:10.1016/S0921-5093(01)01709-9
- [12] 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*, Vol. 170, (2022), p. 107517, doi:10.1016/J.TRIBOINT.2022.107517
- [13] Szalóki I., Csuka S., Csesznok S., Sipos S.: CAN TROCHOIDAL MILLING BE IDEAL?, in *Manufacturing 2012 The XXI. Conference of GTE on Manufacturing and related technologies*, Budapest, Hungary, 2012.
- [14] Kónya G., Kovacs Zsolt F., Kókai E.: Milling of Nickel-based Superalloy by Trochoidal Strategies, in *2022 IEEE 22nd International Symposium on Computational Intelligence and Informatics and 8th IEEE International Conference on Recent Achievements in Mechatronics, Automation, Computer Science and Robotics*, Budapest, Hungary, 2022, pp. 1–6.
- [15] Britannica: Cryogenics, [online] Elérhető: <https://www.britannica.com/science/cryogenics> [Elérés dátuma: 2023.02.14.]
- [16] Kumar G. H., Mohit H., Purohit R.: Effect of Deep Cryogenic Treatment on Composite Material for Automotive Ac System, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 4, No. 2, (2017), pp. 3501–3505, doi:10.1016/J.MATPR.2017.02.240
- [17] Kale A., Khanna N.: A Review on Cryogenic Machining of Super Alloys Used in Aerospace Industry, *Procedia Manufacturing*, Vol. 7, (2017), pp. 191–197, doi:10.1016/J.PROMFG.2016.12.047
- [18] Deshpande S., Deshpande Y.: A review on cooling systems used in machining processes, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 18, (2019), pp. 5019–5031, doi:10.1016/J.MATPR.2019.07.496
- [19] Cordes S., Hübner F., Schaarschmidt T.: Next generation high performance cutting by use of carbon dioxide as cryogenics, *Procedia CIRP*, Vol. 14, (2014), pp. 401–405, doi:10.1016/J.PROCIR.2014.03.091
- [20] Braton N. R.: *Cryogen Properties and Processes*, in *Cryogenic Recycling and Processing*, Broken Sound Parkway, Florida: Talyer & Frances Group, 2018, pp. 39-55.
- [21] Jebaraj M., Pradeep K., Anduraj R.: Effect of LN2 and CO2 coolants in milling of 55NiCrMoV7 steel, *Journal of Manufacturing Process*, Vol. 53, (2020), pp. 318–327, doi:10.1016/J.JMAPRO.2020.02.040
- [22] Kalsi N. S., Sehgal R., Sharma V. S.: Cryogenic Treatment of Tool Materials: A Review, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 25, No. 10, (2010), pp. 1077–1100, doi:10.1080/10426911003720862
- [23] Jacsó Á., Mátyási Gy., Szalay T.: Trochoidal Tool Path Planning Method for Slot Milling with Constant Cutter Engagement, *Advances in Industrial and Production Engineering: Select Proceedings of FLAME 2020.*, (2021) pp. 659–668, doi:10.1007/978-981-33-4320-7_59
- [24] Lovász Forgácsoló Kft.: Keményfém maró katalógus BZL001, [online] Elérhető: https://lovaszkft.hu/wpcontent/uploads/2021/01/Lo%v%C3%A1sz-BZL-katal%C3%B3gus_21_2.pdf [Elérés dátuma: 2023.02.14.]