

A SZERSZÁMÉLTARTAMOT BEFOLYÁSOLÓ TÉNYEZŐK NIKKEL-BÁZISÚ SZUPERÖTVÖZETEK HORONYMARÁSAKOR

FACTORS INFLUENCING TOOL LIFE IN SLOT MILLING OF NICKEL-BASED SUPERALLOYS

Kónya Gábor^{1*}, 0000-0003-1531-5921, Kovács Zsolt Ferenc¹, 0000-0002-6995-6508,
Takács János², 0000-0002-3849-5753

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

<https://doi.org/10.47833/2023.2.ENG.005>

Kulcsszavak:

Nikkel-bázisú szuperötvözetek
Horonymarás
Szerszáméltartam
Kísérleti módszertan
Alap kutatás

Keywords:

Nickel-based superalloys
Slot milling
Tool life
Experimental methodology
Fundamental research

Cikktörténet:

Beérkezett 2023. március 24.
Átdolgozva 2023. szeptember 2.
Elfogadva 2023. szeptember 9.

Összefoglalás

Jelen publikációban a szerszáméltartamot befolyásoló tényezőket mutatjuk be, rendszerezük és illesztjük Nikkel-bázisú szuperötvözetekhez annak érdekében, hogy a kutatási célok egyértelműen meghatározhatók legyenek. Ehhez először feltárjuk a megmunkálandó alapanyag tulajdonságait, melyhez a többi tényezőt illeszteni tudjuk. Továbbiakban feltárjuk, hogy az adott területeken mások mit értek el, mik az előnyeik és meghatározásra kerülnek azon területek, melyeket vizsgálni kell.

Abstract

In this paper, the factors influencing tool life are presented, systematized and matched to nickel-based superalloys in order to clearly define the research objectives. To do this, we first explore the properties of the material to be machined, to which the other factors can be fitted. We will then explore what others have achieved in these areas, what their advantages are and identify the areas that need to be investigated.

1. Bevezetés

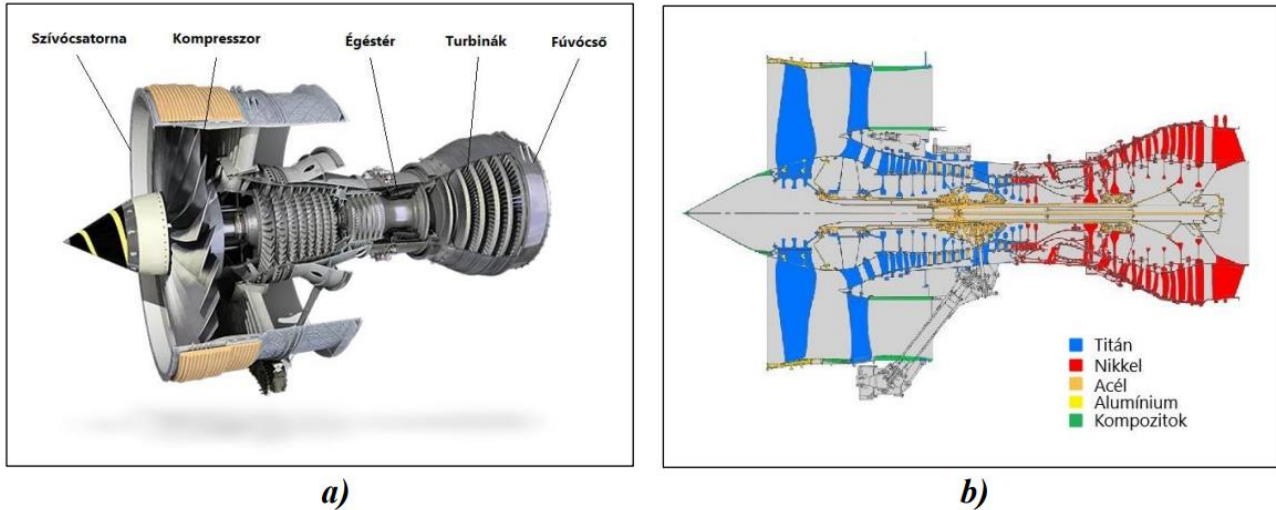
A szuperötvözetek elsődleges felhasználási területe a repülőgép- és energetikai iparban használatos gázturbina. Ahogyan az 1. ábrán is látható, a Nikkel-bázisú szuperötvözeteket elsősorban a gázturbinák magas hőmérsékletű részein alkalmazzák [1], mint például az égéstérben, a turbinában és a gázcsőben. Ebben a közegben extrém magas hőmérsékleti (1400-1500 °C) [2] és nyomásviszonyok (40 bar) vannak jelen [3] nagyon korrozív- és oxidáló környezetben [4], miközben az üzemi fordulatszám a 10000 1/perc-et is meghaladja [5]. Ez az extrém magas hőmérséklet a gázturbinák hatásfokának növeléséhez szükséges, hiszen a többi hőerőgéphez hasonlóan a hatásfok úgy növelhető, hogy a munkaközeg maximum és minimum hőmérséklete közti különbséget növeljük, ennek köszönhetően a mai gázturbinák hatásfoka megközelíti a 60%-ot [6].

Az alkalmazási területből adódóan a szuperötvözetekkel szemben támasztott elsődleges kritérium a nagy melegszilárdság, a kúszással, a hő- és korrózióállósággal szemben való ellenállás.

* Kónya Gábor
E-mail cím: konya.gabor@gamf.uni-neumann.hu

Ezen tulajdonságok teszik oly kedvezővé alkalmazásukat, azonban pont ezen jellemzők miatt válnak nagyon nehezen megmunkálhatóvá. Ipari tapasztalatok alapján a horonymarás okozza a legnagyobb problémát, mert a szerszámok gyorsan kopnak, gyakoriak a törések is.

Jelen publikációban a szerszámélettartamot befolyásoló tényezőket ismertetjük, rendszerezünk, annak érdekében, hogy egy tudatos kutatási módszertant tudjunk kialakítani.



1. ábra: Rolls-Royce Trent 800 típusú gázturbina a) egyes részegységei, b) teljes metszete és a részegységeknél felhasznált alapanyagok [7], [8]

2. Nikkel-bázisú szuperötvözetek

A szakirodalom négy különböző alapú szuperötvözetet különböztet meg: a nikkel-, a vas-, a kobalt- és a titán alapú szuperötvözeteket, mely típusokra konkrét példákat Thellaputta és társai szedtek össze kutatásukban [5]. A GTD-111, melynek forgácsolhatóságával foglalkozunk, a nikkel-bázisú szuperötvözetek közé tartozik, melyet elsősorban a gázturbinák alapanyagaként használnak, mivel az Inconel 718 LC alapanyaghoz képest kb. 20%-nál nagyobb a kúszásállósága és nagyobb alacsony ciklusú fáradási szilárdsággal rendelkezik, mely abból ered, hogy az Inconel-ek a vas-nikkel szuperötvözetek csoportjába tartoznak [9].

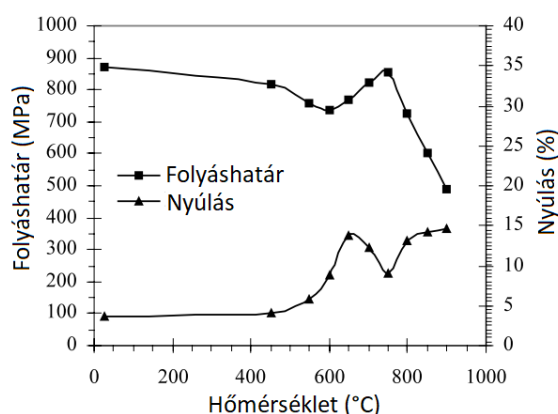
2.1. GTD-111 anyagjellemzői

A GTD-111 mechanikai- és fizikai tulajdonságai az 1. táblázatban láthatók.

1. Táblázat. GTD-111 mechanikai és fizikai tulajdonságai [10], [11]

Mechanikai tulajdonság jellemzők	Szakítószilárdság, R_m (MPa)	Nyúlás A_5 (%)	Kontrakció Z (%)	Keménység (HRC)
		1310	8	5
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		$0,452 \times 10^3$

A GTD-111 folyáshatárának és nyúlásának hőmérsékletfüggése az 2. ábrán figyelhető meg. A grafikon jól szemlélteti, hogy a hőmérséklet növelésével kezdetben a folyáshatár csökken és a nyúlás nő, majd olyan 600-650 °C környékén megugrik a folyáshatár és visszaesik a nyúlás értéke, majd a hőmérséklet további növelésével elkezd az alapanyag kilágyulni. Forgácsolás során igyekezni kell e hőmérséklet fölé emelni a forgácsolási zóna hőmérsékletét, ez azonban az alkalmazható szerszámanyagok körét jelentősen lecsökkenti.



2. ábra: A GTD-111 folyáshatárának és nyúlásának hőmérsékletfüggése [12]

2.2. GTD-111 kémiai összetétele

A Nikkel-bázisú szuperötvözetek alapja a nikkel és az alumínium. Ezek egészülnek még ki egyéb ötvözőkkel attól függően, hogy milyen felhasználási területen kívánják azt alkalmazni. [1], [2]. A GTD-111 Nikkel-bázisú szuperötvözet kémiai összetétele az 2. táblázatban látható.

2. Táblázat. GTD-111 kémiai összetétele [10], [11]

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

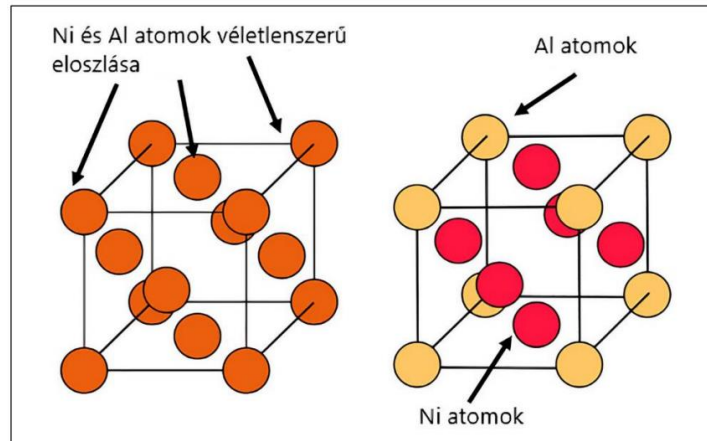
A Ni-bázisú szuperötvözetekben az ötvözőelemek száma gyakran lehet 10 vagy annál több, ebben a tekintetben a legbonyolultabb ember által alkotott ötvözetek közé sorolható. Sokféle ötvözőelemet használnak ezen szuperötvözetekben, azonban néhány általános ötvöző közös bennük. A legtöbb nikkel szuperötvözet nagymennyiségű alumíniumot, titánt, krómot és kobaltot tartalmaz. Gyakran alkalmaznak kisebb mennyiségben cirkóniumot, bórt és szenet is. Egyéb ötvözőelemeket is tartalmazhatnak egyes ötvözetek: volfrámot, hafniumot, réniumot és tantált az átmeneti fémek 6. periódusából; illetve az 5. periódusából: cirkóniumot, nióbiumot, molibdént és réniumot is. Vannak olyan szuperötvözetek, amelyek nagy mennyiségben tartalmaznak vasat is, ezek az úgynevezett nikkel-vas-szuperötvözetek, mint például: az IN706 és IN718. Az egyes ötvözőelemek viselkedése és fázisstabilitása jelentős mértékben függ, az adott elem periódusos rendszerben elfoglalt helyétől [13]. A 3. táblázatban a leggyakrabban használt ötvözők és azok hatásai láthatók.

3. Táblázat. Az ötvözők hatásai Ni-bázisú szuperötvözetekben [1], [2], [13]

Ötvözőelemek	Hatásuk
Ni	Stabilizálja a lapközepes köbös rácsszerkezetű mátrixot, γ' ($\text{Ni}_3(\text{Al},\text{Ti})$) fázist képez, meggátolja a káros fázisok kialakulását.
Cr	Biztosítja az oxidációval szembeni védelmet, karbidokat képez és a szilárd oldat képződést elősegíti, illetve szemcsehatár karbidokat képez.
Co	Megemeli a γ' fázis szolvusz hőmérsékletét és csökkenti rádermedési hiba energiáját (ezáltal a csavardiszlokációk keresztülcsúszását megnehezíti).
Mo, Ta, W	Szilárd oldat keletkezésének elősegítése és MC-típusú karbidok képzése.
Ti	γ' ($\text{Ni}_3(\text{Al},\text{Ti})$) és MC-típusú karbidok képzése.
Al	γ' ($\text{Ni}_3(\text{Al},\text{Ti})$) képzése és javítja az oxidációval szembeni ellenállást.
B, Zr	Javítja a feszültségrepedési tulajdonságokat és késlelteti a szemcsehatár NiTi_3 kialakulását. Javítja a kúszásállóságot.
C	Karbidok képzése (MC, M_{23}C_6 stb. típusok).
Nb, Ta	γ'' (NiNb_3) és MC-típusú karbidok képzése.

2.3. Szövetszerkezet

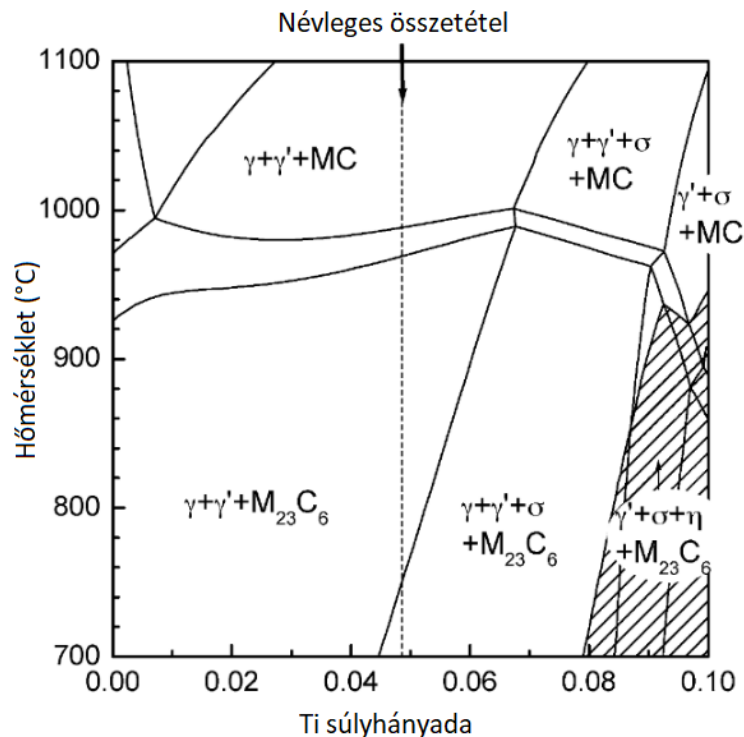
A Ni-bázisú szuperötvözetek alapvetően két fázisból állnak: egy γ - és egy γ' -szilárd oldatból. Mindkét fázis lapközepes köbös rácsszerkezetű, ahol a γ -fázisban rendezetlenül helyezkednek el a Ni és Al atomok a rácsban, míg a γ' -fázis esetén meghatározott, a lapközepen a Ni atomok, míg a csúcspontokban az Al atomok helyezkednek el, ahogyan a 3. ábrán megfigyelhető [14], [15]. A γ -fázis nem mágnesezhető, ausztenites fázis, mely magas százalékban tartalmazza a következő összetevőket: kobaltot, vasat, krómot és molibdént [5]. Rendkívül magas, 60% feletti γ' – fázissal rendelkezik [16], [17], ezáltal a turbinában fellépő igénybevételeknek rendkívül ellenáll.



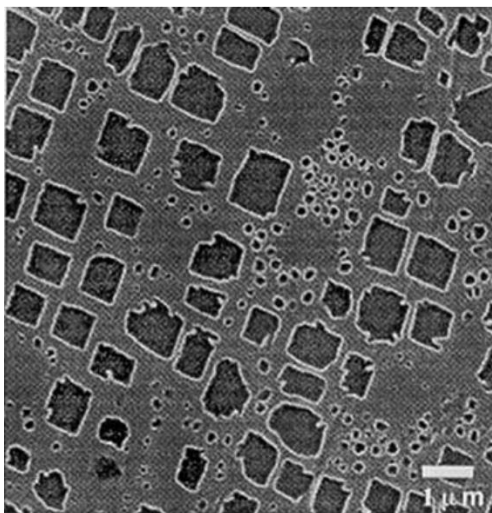
3. ábra: A γ - és a γ' - fázisok rácsszerkezete standard hőkezelés után [15]

Mivel mindkét fázisnak azonos, lapközepes köbös (FCC) a rácsszerkezete, így a cellák élei kapcsolatban vannak egymással. A két fázis között a diszlokációk nehezen tudnak átlépni a γ -fázisból a γ' -fázisba, mivel abban az atomok rendezett elhelyezkedése gátolja a diszlokációk mozgását, amelynek következtében nő az ötvözet szilárdsága [14], [15].

A GTD-111 egyensúlyi fázisdiagramja a 4. ábrán, szövetszerkezete az 5. ábrán látható.



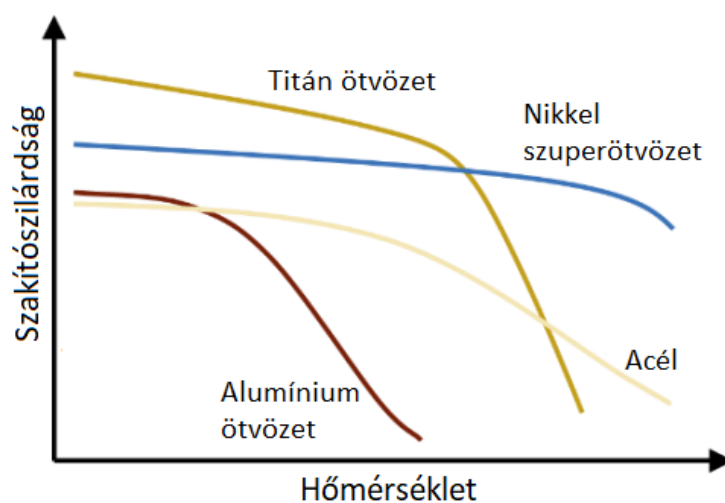
4. ábra: GTD-111 egyensúlyi fázisdiagramja [18]



5. ábra: GTD-111 szövetszerkezete [16]

Megjegyzés: a világosabb fázis a matrix, a sötétebb a γ' -fázis

A fémötvözetekre általánosan jellemző, hogy a szilárdságuk a hőmérséklet növekedésekor lecsökken, mivel a diszlokációk könnyen elmozdulnak magas hőmérsékleten. Ezzel szemben azon szuperötvözetek esetében, melyek Ni_3 (Ti, Al) összetételű γ' -fázist tartalmaznak, nagyon magas hőmérsékleten is megőrzik szilárdságukat [19], ahogyan a 6. ábrán lévő összehasonlításon is megtekinthető.



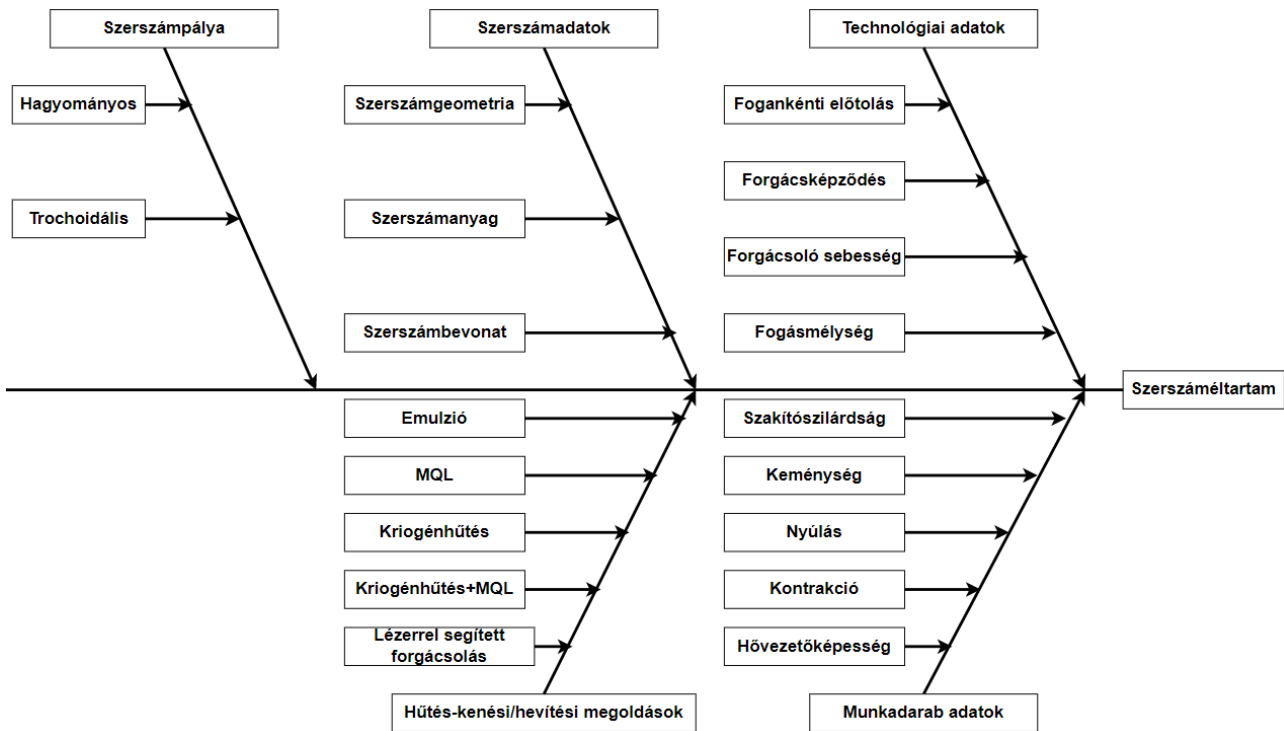
6. ábra: Szakítószilárdság hőmérsékletfüggése különböző anyagok esetén [3]

Alapvetően a γ - és γ' -fázisokban az $\{111\}$ -síkon jelennek meg a diszlokációk (ez a legsűrűbb illeszkedésű sík), azonban az $\{100\}$ -síkokban csökken a fázishatár energiája a hőmérséklet növelésével, ezért a γ' -fázisban el tudnak mozdulni a diszlokációk ezekben az irányokban. Ennek következtében jön létre a szilárdságnövekedés, hiszen az $\{111\}$ és $\{100\}$ - síkon áthaladó diszlokációk blokkolódnak a szövetszerkezetben. Minél nagyobbak a szilárdsági követelmények, annál több γ' -fázissal erősítik a szövetszerkezetet, mely jelentős mennyiségű vanádiummal vagy nióbiiummal történő ötvözés esetén jön létre [14].

A diszlokációs mechanizmusnak fontos szerepe van az anyag kúszásállóságában is, hiszen minél nagyobb az anyag diszlokációs mozgással szembeni ellenállósága, annál nagyobb a kúszásállósága is. A kúszásállóságot befolyásoló másik tényező a diffúzió. A diffúziós folyamatot számos tényező mérsékelni képes, mint például a szemcseszerkezet, a kristályszerkezet és a homológ hőmérséklet [20], [21].

3. Szerszáméltartamot befolyásoló tényezők horonymarás során

A szerszáméltartamot számos tényező befolyásolja, melyek a 7. ábrán tekinthetők meg.

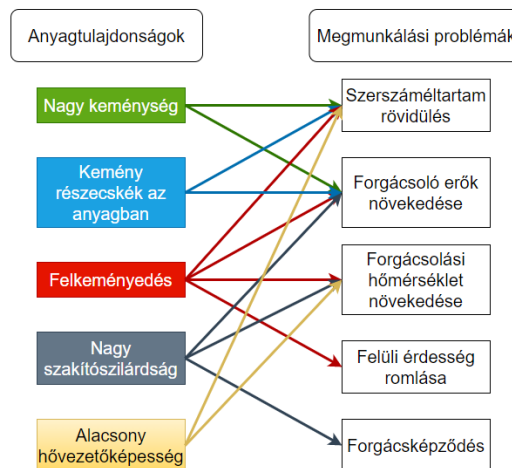


7. ábra: Szerszáméltartamra ható fontosabb tényezők

3.1. Munkadarab adatok

A szuperötvözetek forgácsolása során az anyagtulajdonságokból eredő kihívások a 8. ábrán láthatók:

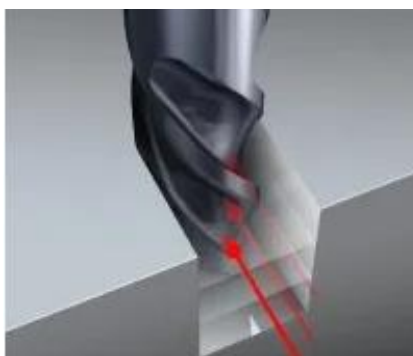
1. a nagy szakítószilárdság és a felkeményedés a forgácsoló szerszámok deformációját okozzák a megmunkálás során;
2. a szerszámok erős abrázív kopásnak vannak kitéve a kemény MC karbidok koptató hatásának következtében;
3. Az alacsony hővezetőképesség miatt a forgácsolószerszám élein koncentriálódik a több, mint 1000 °C-os forgácsolási hőmérséklet;
4. ezen magas hőmérsékleten a munkadarab hajlamos reakcióba lépni a forgácsolószerszám anyagával, ami fokozott szerszámkopást eredményez [22].



8. ábra: Anyagtulajdonságok befolyásolása a megmunkálási problémákra, [22] alapján

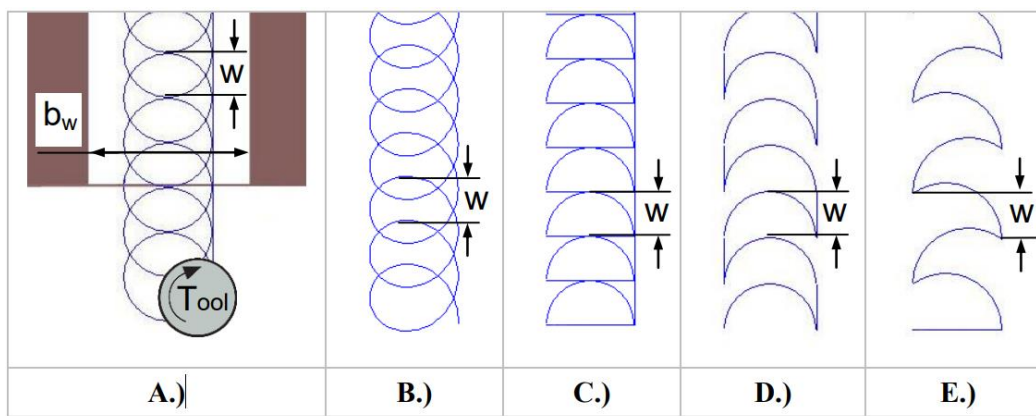
3.2. Horonymarási stratégiák, technológia adatok

A horonymarási eljárások közül két típus terjedt el igazán, a hagyományos, egyenes vonal menti marás és a különféle trochoidális szerszám pályák mentén történő marási eljárások. A hagyományos horonymarás a 9. ábrán látható, amely a legelterjedtebb eddig az iparban, mivel egyszerűen programozható és nagy anyagleválasztási teljesítmény érhető el vele. Ezzel szemben azonban a technológiából adódóan nagy radiális forgácsoló erő ébred, rezgésveszélyes technológia, melyek a szerszám korábbi tönkremenetelét okozzák. Továbbá mivel a kontaktszög 180° , ezért a forgácskihordás nehézkes, ami azt jelenti, hogy a már leválasztott forgácsot az él ismét át kell vágja, ezért a forgács törésről gondoskodni kell, hogy minél kisebb forgácsot kapjunk, ezáltal a forgácsolási zónából történő távozása könnyebbé tud válni [23]. Ezen problémák miatt a nehezen forgácsolható fémötvözetek megmunkálása során kérdésessé vált alkalmazhatósága, ezért vezették be a különféle szerszám pályák mentén horonymarási eljárásokat.



9. ábra: Hagományos horonymarás szerszám pályája olyan esetben, amikor 3 egymás alatti rétegben, külön-külön munkáljuk ki az üregből az anyagot [23]

A definíció szerint a trochoidális horonymarás egyfajta palástmarás, ahol a horony szélességnek legalább 15%-kal nagyobbak kell lennie, mint az használt szerszám átmérője, a léptetés mértékének a szerszám átmérőjének a 2-25 % közé kell esnie és a fogásmélység nem lehet mélyebb, mint a szerszám átmérő kétszerese [24]. A szakirodalomban számos szerszám pályák típusra találhatunk példát, melyek a 10. ábrán láthatók [25]. Ezen szerszám pályák esetén a köríves szakaszokat egyenes szakaszok kötik össze vagy folytonos pályagörbe jellemzi, melyeket valamilyen matematikai függvény segítségével építenek fel [25]. Erre az alagra épülnek a különböző mozgásciklust szemléltető algoritmusok, melyekkel igyekeznek a kontaktszöget állandó értéken tartani a megmunkálás során [26] [27]. Ebből adódóan csökkenthető a szerszámterhelés, ezáltal a szerszám kopás mértéke. A csökkenő forgácsoló erők miatt a forgácsolási sebesség növelhető. Csökken a forgácsolási zónában fellépő hőmérséklet, mivel a kontaktszög lényegesen kisebb, mint a telibemarási esetén, így a szerszám kisebb része vesz részt egy időpillanatban a marásban. Továbbá a kontaktszögcsökkenés miatt javul a forgácseltávolítás is a munkatérből [28].



10. ábra: Különböző trochoidális szerszám pályák alakok [24]
a) körkörös; b) ciklois; c) félköríves; d) lengő; e) lépő lengő

Ebből adódóan azonban az anyagleválasztási teljesítmény elmarad a telibemarásnál elérhető mennyiséghez képest. Mivel a szerszámhályga jóval bonyolultabb, ezért olyan szerszámgeometria is szükség van, amely a nagy felbontású CNC kódot olvasni és kezelni is tudja, illetve ezen szerszámhálygák programozása jóval nehezebb feladat.

Szalóki és társai (2012) a 10. ábrán látható stratégiákat és a lineáris horonymarást tesztelték állandó forgácsoló sebesség és fogankénti előtolás mellett 40CrMnMo7 típusú alapanyagban, csak az oldallépés mértékét és a tengelyirányú fogásmélységet változtatták. Arról számoltak be, hogy a növelt fogásmélység és oldallépés minden esetben növelte az anyagleválasztási teljesítményt és a forgácsolóerőket. A körkörös, a ciklois és a félköríves marás esetén azonos erőértékeket kaptak, azonban a lengő- és lépő-lengő stratégiánál ez jelentősen megugrott. Ez annak köszönhető, hogy ebben az esetben a szerszám egyen- és ellenirányú marást valósít meg folyamatosan, továbbá a fogásvétel folyamatosan frontálisan történik. A felületi érdességet tekintve a telibemarást hozta a legjobb eredményt [24].

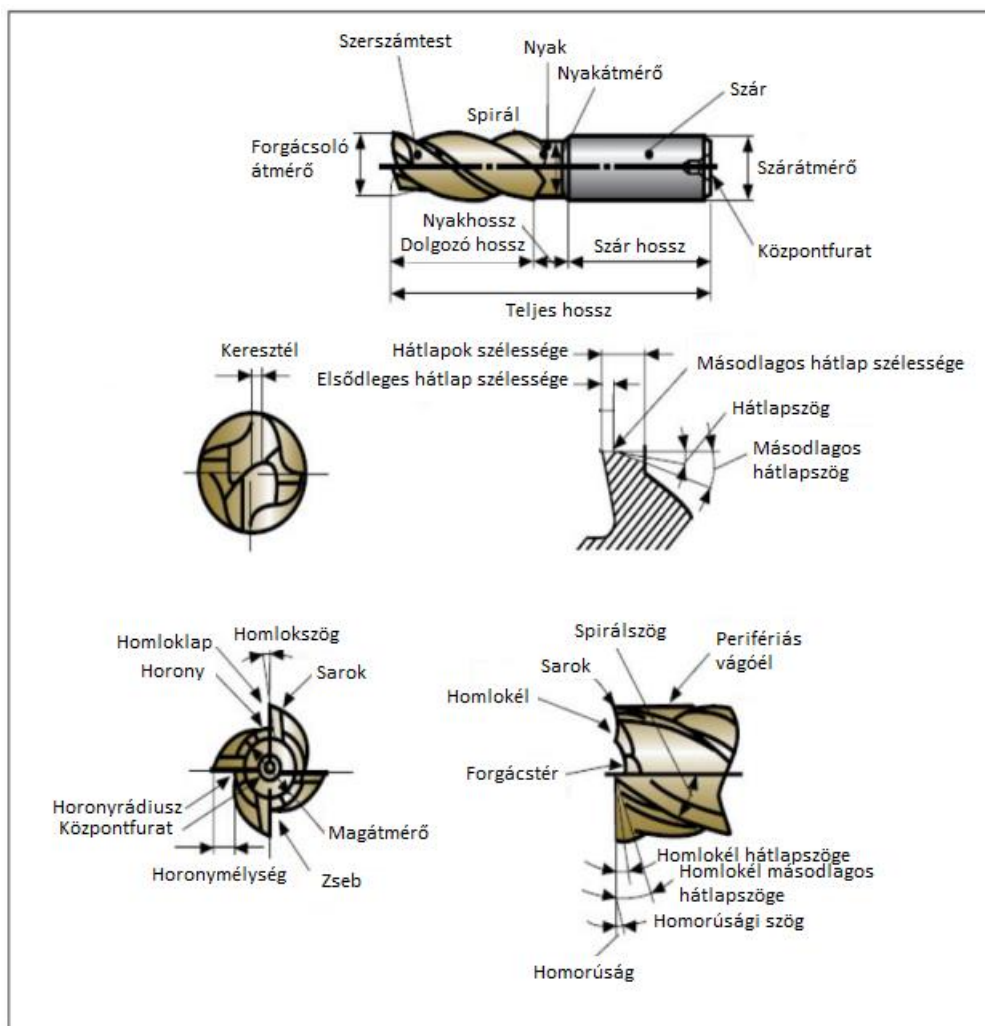
Potthoff és Wiederkehr (2021) kutatásukban Inconel 718-at munkáltak meg trochoidális marással és hagyományos telibemarással, konstans technológiai adatokkal, csupán a hűtés hatását vizsgálták még, egyik esetben alkalmazták, a másikban nem. Trochoidális marás esetén adott hátkopási kritérium ($VB=0,6$ mm) mellett kétszer több anyagmennyiséget tudott leválasztani, mint telibemarást esetén. A kutatásban a hűtés-kenés jelentősége szembevetendő, hiszen alkalmazása esetén közel négyszer több anyagmennyiséget tudtak leválasztani [29].

Alabanda és társai (2021) EN AW 2024-T3 ötvözetet martak lóverseny alakú szerszámhálygával, során a fogankénti előtolás, a forgácsoló sebesség, az oldallépés és a tengelyirányú fogásmélység hatásait vizsgálták. Megállapították, hogy az anyagleválasztási teljesítményt legfőképp a fogankénti előtolás és a radiális fogásmélység befolyásolja. A felületi érdesség kisebb oldallépés és fogankénti előtolás esetén javul, továbbá szintén a fogankénti előtolás befolyásolja leginkább az energiafelhasználást [30]. Az áttekintett szakirodalmak alapján megállapíthatók az általános tendenciák, azonban olyan komplex szakirodalom nincs, ami mindezt egyben vizsgálta volna.

Korábbi kutatásaimban [10] [31] a horonymarás során azt a jelenséget tapasztaltam, hogy a horony oldalfala megmunkálási hossz függvényében jelentősen összetartóvá válik, mely a szerszámkopás mértékével nem magyarázható, mert amíg a szerszám csak 0,01-0,02 mm-t kopott átmérőben, addig az horony mérettartása 0,4-0,5 mm-t romlott. Ez a jelenség a szerszám élességének kopásával lehet összhangban, mert amikor bekopik a szerszám, az élradiusz (ρ_β) megnő, továbbá az alapanyag miatt csak nagyon kis fogankénti előtolás (0,01-0,02 mm) használható, így lényegében a szerszám éle nem tud behatolni az anyagba, hanem a nagyobb élradiusz miatt először súrlódik, 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, ennek eredménye lesz a rossz mérettartás. Erre a problémára megoldás lehet egy olyan szerszámhályga megalkotása, mely figyelembe veszi ezt a jelenséget és folyamatosan növeli a szerszámhályga hurokátmérőjét vagy adaptívan változtatja a fogankénti előtolást.

3.3. Szerszám adatok

A forgácsoló szerszámok kialakításának rendkívül nagy jelentősége van a forgácsolási folyamatban, hiszen mind a szerszámanyagok, a különféle bevonatok és a szerszámgeometria is befolyásolja a szerszámélettartamot. A mai kielezett piaci versenyben nélkülözhetetlen a forgácsoló szerszámok fejlesztése, ezért fontos kutatási terület. A hosszlyukmarók szerszámgeometriája a 11. ábrán látható, mely Syafik és társai (2016) munkássága alapján készült.



11. ábra: Egy szabványos hosszlyukmaró elvi szerszámgeometriája „[32] alapján”

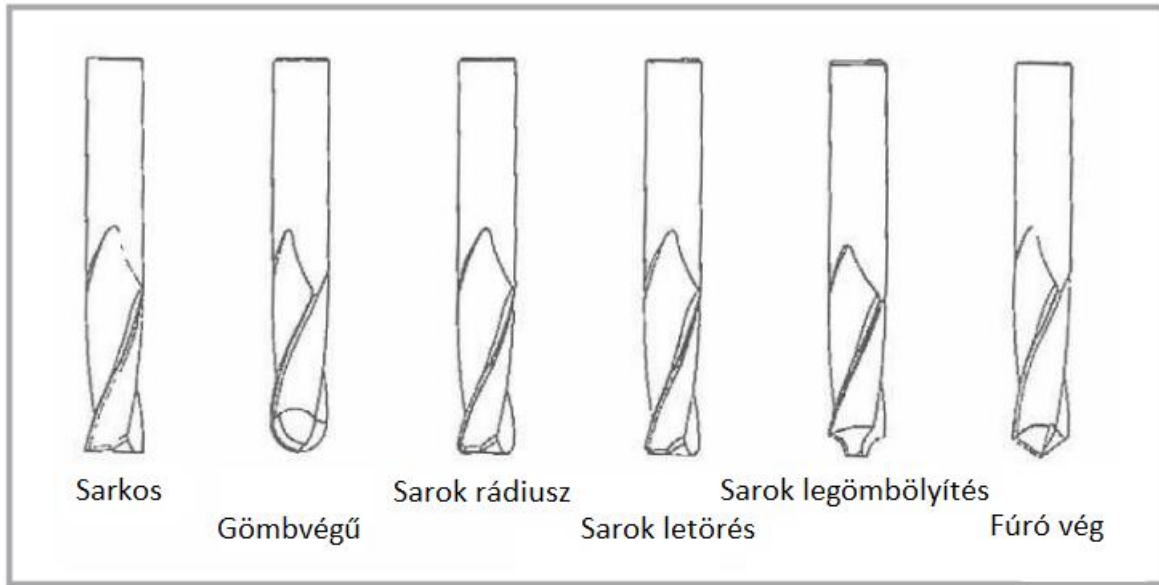
Syafik és társai (2016) kutatásukban Al7075-t munkáltak meg keményfém maróval. A kísérlet során a spirálszög (30° ; 60°), az elsődleges (5° ; 9°)- és másodlagos (14° ; 17°) hátlapszög értékeit változtatták és vizsgálták hatásait a szerszámkopásra és a megmunkált horony felületi érdességére. Azt az eredményt kapták, hogy a magasabb elsődleges hátlapszög növeli a szerszámkopást, még a másodlagos hátlapszög csökkenti azt. Nagyobb spirálszög szintén növeli a szerszámkopást. A magasabb elsődleges hátlapszög növeli az axiális felületi érdességet, még a radiálist csökkenti [32].

Karagiannis és társai (2014) 5083-as alumíniumban végeztek forgácsolási kísérleteket, a cél az egyes technológiai adatok hatásának vizsgálata a forgácsolási folyamatra. A kísérlet során a magátmérő százalékos arányát (48% ; 50%), a spirálszöget (38° ; 45° ; 50°), a homlokszöget (18° ; 20° ; 22°), az elsődleges (20° ; 22° ; 25°)- és másodlagos (25° ; 28° ; 30°) hátlapszöget változtatták. Továbbá vizsgálták a fogásmélység ($0,5\text{ mm}$; 1 mm ; $1,5\text{ mm}$), a fordulatszám (5000 1/perc ; 6000 1/perc ; 7000 1/perc) és a fogankénti előtolás ($0,05\text{ mm/fog}$; $0,08\text{ mm/fog}$; $0,1\text{ mm/fog}$) befolyását. Optimumként a magátmérő (50%), a spirálszög (38°), a homlokszög (22°), az elsődleges (22°)- és másodlagos hátlapszög (30°), fogásmélység ($1,5\text{ mm}$), fordulatszám (5000 1/min) és a fogankénti előtolás ($0,08\text{ mm}$) adatkombinációt kapták [33].

Kopak és Krajnik (2007) alumínium ötvözet kontúrmarását vizsgálták keményfém hosszlyukmaróval. A kísérletek során 2, 3 és 4 élű szerszámokat alkalmaztak. Eredményül azt kapták, hogy a kisebb fogszám jobb felületminőséget eredményezett [34].

Ku és Chia (2006) többcélú keményfém hosszlyukmaró tervezése során arról számoltak be, hogy a kisebb élszámú marók nagyobb forgácstérrel rendelkeznek és jobb forgácseltávolítást eredményeznek, melyek így kiválóan alkalmasak nagyoló megmunkálásra. A kisebb fogszám nagyobb forgácstérrel rendelkezik, még a merevsége kisebb, a nagyobb fogszámú maróknak

viszont kisebb a forgácsterük, viszont nagyobb a merevségük. A marók végkialakítása számos módon történhet, melyre példák a 12. ábrán láthatók [35].



12. ábra: Hosszlyukmarók végkialakításai [35] alapján

Forgácsoló szerszám tervezésével és az élgeometriát meghatározó adatok vizsgálatával nagyon kevesen foglalkoztak (főleg a 2010 előtt), ők is alumíniumban vizsgálták. Ezen kutatások során látható általános trendek nem biztos, hogy szuperötvözetek forgácsolásánál is megfelelő, ezért mindenképp érdemes megvizsgálni. A szerszáméltartamra nézve korábban senki sem vizsgálta a fogszámok hatásait (páros, páratlan), annak eloszlását (szabályos, szabálytalan), a változó spirálszög hatásait, a kihegyezést, forgácstér kialakítását, a sarok kialakítását és a forgácsosztó hatásait.

3.4. Hűtés-kenési eljárások

Napjainkban, mikor fenntarthatóságról beszélünk forgácsolás során, a következő három dologra kell gondolni. A gazdasági dimenzió kapcsán figyelembe kell venni a gyártás során felmerülő költségeket, a termelékenységet és azt, hogy az alkalmazott technológia során a legkedvezőbb megmunkálási körülmények legyenek megteremtve. A környezeti dimenzió magában foglalja a hűtő-kenő anyagok fogyasztásának mérséklését, az energiafogyasztás csökkentését, a hulladékgazdálkodást és a környezetvédelmi szabályozásokat. És nem utolsósorban, a harmadik, a társadalmi dimenzió a munkavállalók egészségét és biztonságát veszi figyelembe [36]. Egy mai gépgyártó vállalatnak a fenntarthatóság jegyében e három dimenzió figyelembevételével kell terveznie.

A nehezen forgácsolható fémötvözetek kapcsán új kutatási terület kezd kialakulni, a kriogénhűtéssel segített forgácsolás, mivel a 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 alacsonyabb 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 [37].

A kriogén hűtési eljárást az élet számos területén alkalmazzák, mint például az orvosi [38]-, az autó [39]- és repülőgépiparban [39]. A kriogén hűtési eljárás két féle megoldásként jelenik meg ezen ötvözetek forgácsolásában, egyrészt hőkezelik a forgácsoló szerszámokat megmunkálás előtt, ezzel növelve a szerszám éltartamát, másrészt hűtőközegként juttatják oda a forgácsolási zónába [40].

Leggyakrabban használt közegek a CO₂ és az LN₂ [41], azonban számos más közeget is alkalmaznak, min például argont, hidrogént, neont, héliumot és etánt [42]. 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) mély kriogén kezelésnek a folyamatot, mikor a nitrogént használják [43]. 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) [44]. Ennek az eljárásnak a jellegzetessége, hogy mikor a folyékony CO₂ elhagyja a fúvókát, és a hőmérséklet lecsökken, akkor szilárd- és gáznemű 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 [43].

Aramcharoen és társai (2014) és Jebaraj és munkatársai (2020) arról számoltak be, hogy a forgácsolási hőmérséklet nagymértékben csökkent, javult a súrlódási viszony a munkadarab és a szerszám között. Nagymértékben tudták csökkenteni a fellépő forgácsoló erőket, ezáltal a szerszámkopást is. Javult a forgácsolás és a megmunkált horony felületi érdessége is [45] [43].

Hong (2007) kutatásában azt állítja, hogy a kriogén hűtés hatására a kialakuló folyadék/gáz film csökkenti a súrlódást az érintkező felületek között, ezáltal csökken a fellépő forgácsoló erő és csökken a szerszámkopás és javul a forgácsolt felület érdessége [46].

Lu és társai (2018) munkájukban összehasonlították a különböző hűtő-kenő eljárásokat számos tényező alapján, mely a 4. táblázatban látható.

4. Táblázat. Hűtés-kenési eljárások összehasonlítása különböző szempontok szerint

Hűtés-kenési eljárások hatékonysága	Emulzió	Száraz (sűrített levegő)	MQL	Kriogén (LN ₂)	Hibrid (LN ₂ +MQL)
Hűtés	Jó	Kedvezőtlen	Nincs hatással	Kitűnő	Kitűnő
Kenés	Kitűnő	Kedvezőtlen	Kitűnő	Nincs hatással	Kitűnő
Forgács eltávolítás	Jó	jó	Nincs hatással	Jó	Jó
Gép hűtés	Jó	Kedvezőtlen	Kedvezőtlen	Nincs hatással	Nincs hatással
Munkadarab hűtés	Jó	Kedvezőtlen	Kedvezőtlen	Jó	Jó
Por/részecskék eltávolítása	Jó	Kedvezőtlen	Nincs hatással	Nincs hatással	Jó
Felületi érdesség	Jó	Kedvezőtlen	Nincs hatással	Kitűnő	Kitűnő

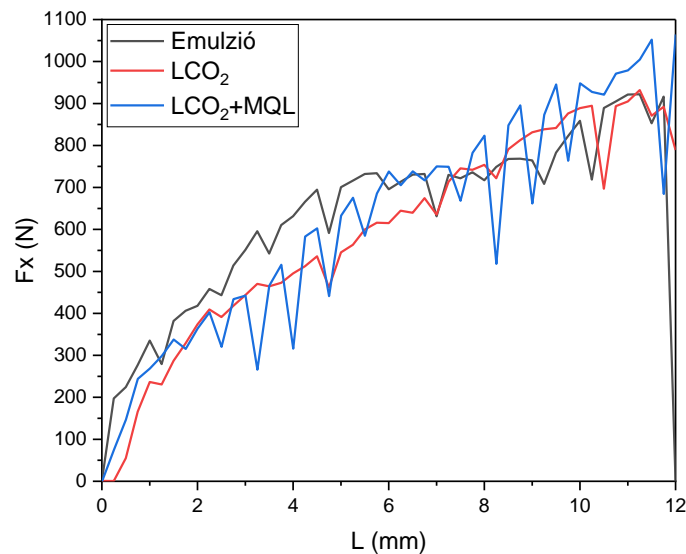
E kedvező tulajdonságok miatt teszteltem a folyékony szén-dioxiddal (LCO₂), az LCO₂+MQL kombinációval történő hűtést GTD-111 típusú Nikkel-bázisú szuperötvözet forgácsolásakor és a kapott eredményeket összehasonlítottam az emulziós hűtés során kapott eredményekkel. A kísérletek során minden esetben 12 mm hosszú, 10 mm mély és 12 mm széles hornyokat munkáltam meg. A marási kísérletekhez 8 mm átmérőjű, 5 élű tömör keményfém szerszámokat használtam [47]. A használt technológiai paraméterek az 5. táblázatban láthatók. A kutatásban néztem a hűtés-kenési eljárások hatásait a munkadarabra ható forgácsoló erőre, a szerszámkopásra, a forgácsolásra, a megmunkált felület érdességre, a megmunkált hornyok sorja képződésére.

5. Táblázat. Alkalmazott technológiai paraméterek

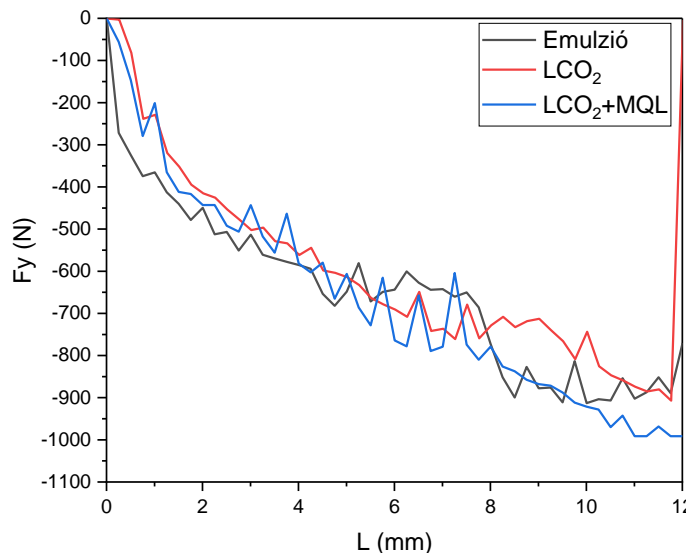
Forgácsolási sebesség, v _c (m/min)	Fogankénti előtolás, f _z (mm/fog)	Axiális fogásmélység, a _p (mm)	Radiális fogásmélység, a _e (mm)
28	0,01	10	0,8

Az erőméréshez Kistler 9257B típusú 3 komponensű erőmérőt használtunk Kistler 5007 típusú analóg jelerősítővel. Az eredmények rögzítése Dynoware szoftverrel történt, kiértékelése pedig OriginPro 2021 szoftverrel.

A munkadarabra ható erőkomponensek az egyes hűtő-kenő eljárások esetén a 13-15. ábrán láthatók. Az X- és Y-irányú erőknél a 13. és 14. 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 mart hossz második felében változott és az 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 erőket mértem a sima folyékony széndioxidhoz képest, azonban a horonymarás végső szakaszában itt figyeltem meg a legnagyobb 1050 N-os erőket. A három görbét összevetve az LCO₂-es hűtés esetében volt a legegyszerűsebb a terhelés felfutása, kisebb kilengések láthatók a diagramokon.



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

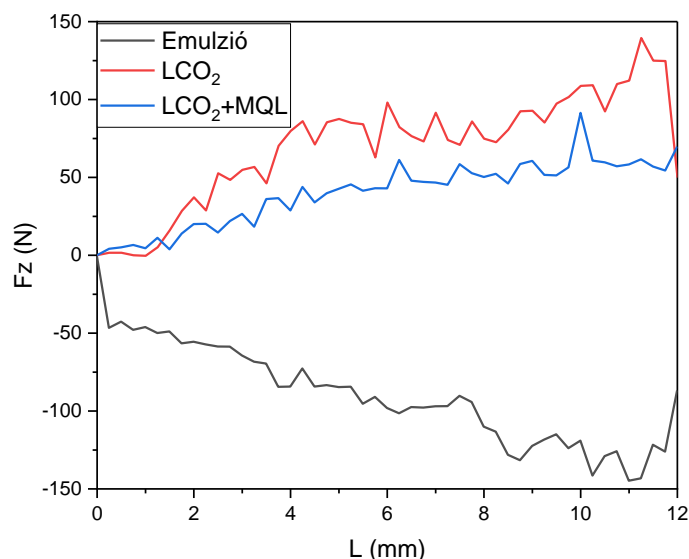


14. ábra: A munkadarabra ható Y-irányú erőkomponensek az egyes hűtés-kenési eljárások esetén

A Z-irányban fellépő erőknél (15. ábra) látható, hogy a két 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 mértem a sima LCO₂-os hűtéshez képest. Az emulziós hűtés

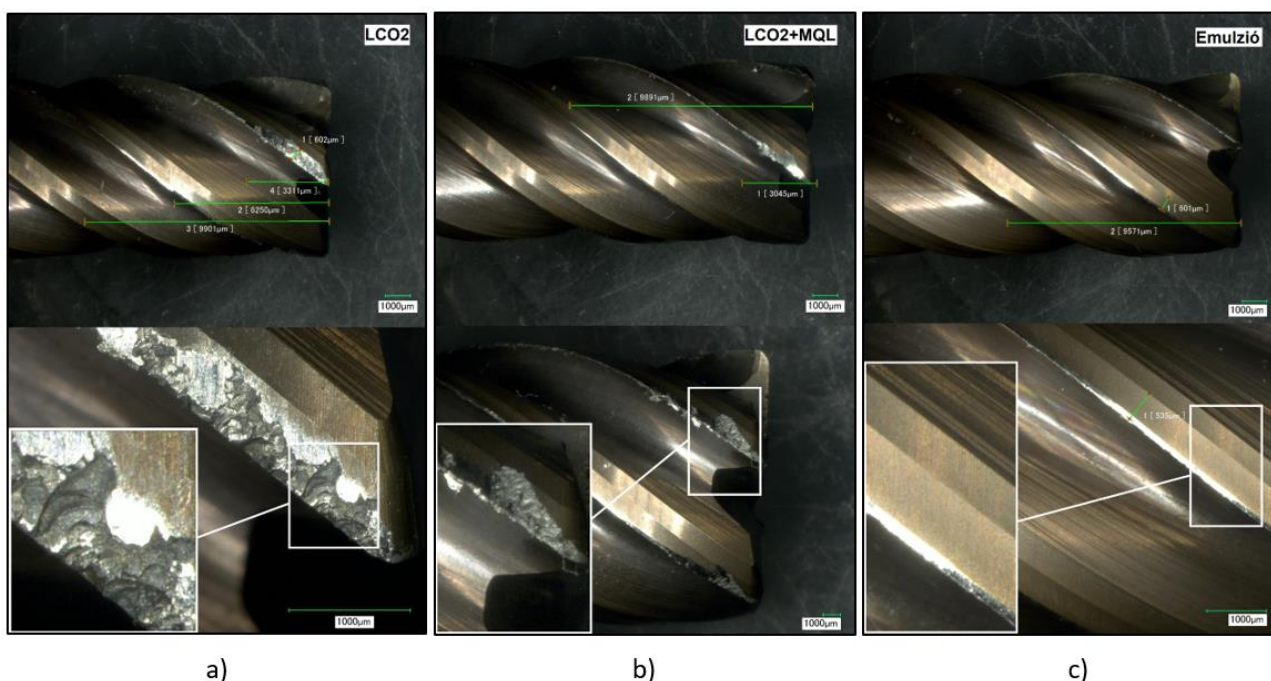
és a folyékony szén-dioxidos esetében mért erők, habár ellentétesek azok hasonló tendenciával változnak és közel azonos értékeket vesznek fel, utóbbinál kissé nagyobb kilengésekkel. A z-irányú erőknél egyértelműen megállapítható, hogy az LCO₂+MQL hűtési mód volt a legkedvezőbb.

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 fel akarná tépni a megfogás alól, mert ebben az esetben nehezebbé válik a forgácsleválasztás és a maró spiráljával nagyobb húzóerőt fejt ki.



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

A forgácsoló szerszámkopásokról készült mikroszkópi felvételek a 16. ábrán láthatók.

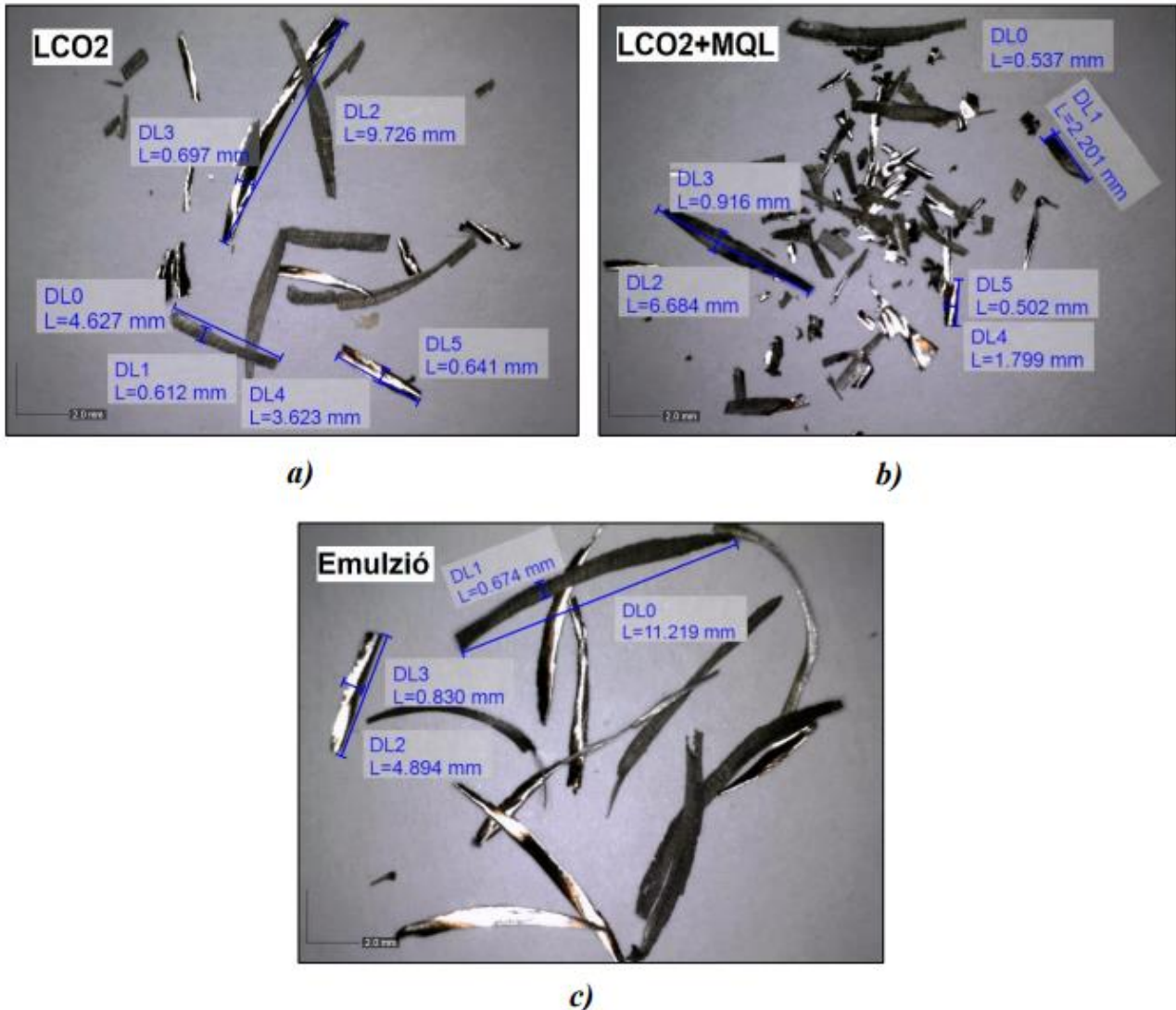


16. ábra: Szerszámkopás jellegzetességei az egyes hűtés-kenési eljárások esetén
a) LCO₂; b) LCO₂+MQL; c) emulzió esetén

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 kipattogzódás a sarkoknál figyelhető meg. Ez annak az eredménye, hogy nem biztos, hogy az olaj eljutott maró végéhez, vagy ha eljutott, akkor lehetséges, hogy az olajrészecskék megfagytak és lepattogtak a szerszám éléről. A legjobb állapotban az emulziós hűtés során maradt a szerszám, ebben az esetben a forgácsolási zónában az élszakaszon az élrádiusz növekedése megfigyelhető. A kísérlet sorozat ezen eredményeiből arra következtettek, hogy kenésnek nagyobb hatása lehet a szerszáméltartamra, mint a hűtésnek. Ennek a megerősítésére további vizsgálatok szükségesek.

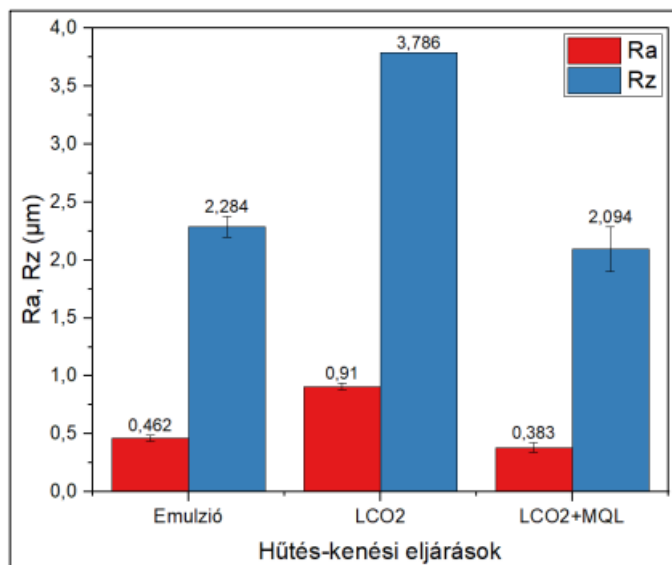
A forgácsolási kísérletek során keletkezett forgácsok a 17. ábrán láthatók.



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

LCO₂ hűtésnél jellemzően 3 – 10 mm hosszúságú és 0,5 - 0,7 mm közelítő átmérőjű forgácsokat figyeltem meg, elvéve találtam kisebb darabokat. Ezzel szemben a folyékony széndioxid 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.

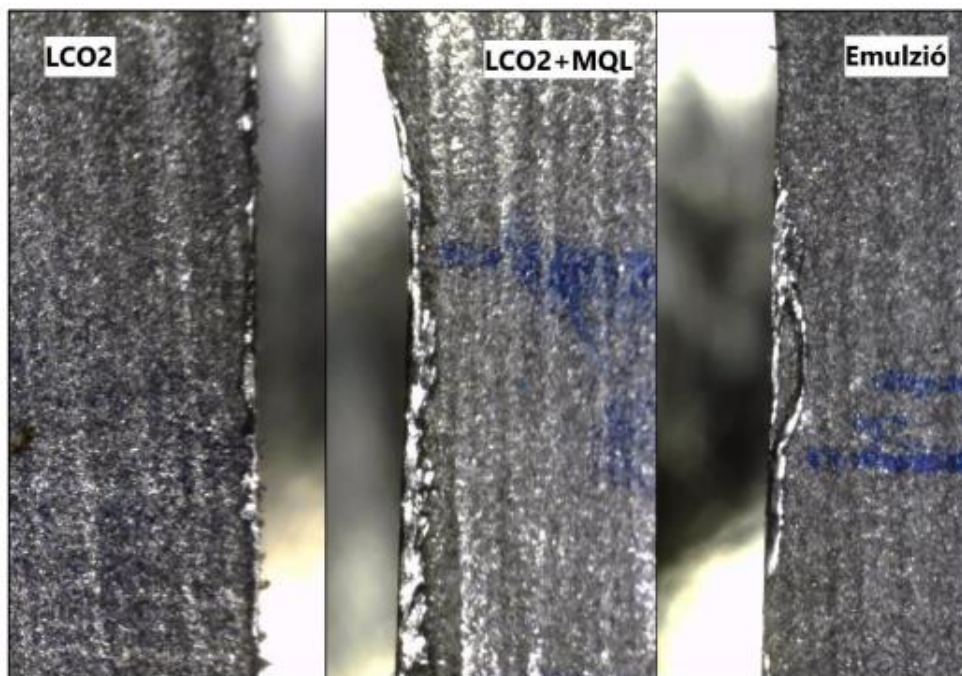
A hornyok talpfelületén mért felületi érdesség az egyes hűtés-kenési eljárások esetén a 18. ábrán látható.



18. ábra: A megmunkált hornyok talpfelületeinek átlagos felületi érdessége és érdességmagassága az egyes hűtés-kenési eljárás esetén

Mindhárom horony esetében háromszor elvégeztem az érdességmérést és a kapott eredmények átlagát ábrázoltam 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 volt a horonymarás során, továbbá az LCO₂ hűtést minimálkenéssel kiegészítve jelentős javulást értem el az emulziós hűtéshez képest is.

A megmunkált hornyok széleinek sorjaképződése a 19. ábrán látható.



19. ábra: Megmunkált hornyok széleinek sorjaképződése

Ahogy a 19. ábrán látható, az LCO₂+MQL esetében keletkeztek a legnagyobb méretű sorják. A sima LCO₂ hűtés esetében a sorjásodás képe hasonló volt az előbbihez, azonban kisebb

felületen jelent meg. Emulzió alkalmazásával sikerült összességében a legkevésbé sorjás hornyokat marni. Elvértve volt észlelhető kicsit nagyobb sorja, amely utómunkálással minimalizálható.

4. Összegzés

Jelen kutatómunkánkban bemutattuk a Ni-bázisú szuperötvözetek alkalmazási területeit, anyagtulajdonságait, szövetszerkezetét. Hagyományos szerkezeti anyagok forgácsolhatóságával összehasonlítottuk a szuperötvözetek megmunkálhatóságát és bemutattunk néhány jellegzetes szerszámkopási és sorjaképződési problémát arra, amelyek bizonyítják, hogy nehezebb a megmunkálhatóságuk ezeknek az anyagoknak. Szisztematikusan megvizsgáltuk azon tényezőket, melyek a szerszáméltartamot befolyásolják, majd elemeztük, hogy más kutatók milyen eredményeket publikáltak az adott területen. Saját vizsgálatainkkal az egyes nehézségekre jellemző példákat mutattunk be, amelyek alapján kijelölhetők a további kutatási, fejlesztési irányok. Saját kutatásunk alapján a következő megállapításokat tesszük:

- A hűtés-kenési eljárásoknak nagy hatása van a szerszámterhelésre és a szerszámkopásra, a megmunkált felület érdességére, a forgácstörésre és a sorjaképződésre.
- A legnagyobb szerszámterhelést és kopást a folyékony szén-dioxiddal történő forgácsolás során mértük. A minimálkenés ezen jelentősen javított, így megállapítható, hogy ezen anyagok megmunkálása során a kenésnek nagyobb jelentősége van, mint a hűtésnek.
- A legjobb felületi érdességet a horony talpfelületén és a legjobb forgácstörést az LCO₂+MQL kombinációval érték el.
- A legkisebb sorjásodást emulziós hűtéssel történő marás után kaptuk.

Irodalomjegyzék

- [1] Antolovich, S. D.: Microstructural aspects of fatigue in Ni-base superalloys, Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2015, vol. 373, no. 2038
<https://doi.org/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, 2012, vol. 22, no. 2, pp. 361–374
<https://doi.org/10.2514/1.18239>
- [3] Olufayo, O. A., Boulaares, M. D., Songmene, V.: Machining/machinability of Rene 65 superalloy for aerospace applications, Proceedings of 2020 IEEE 11th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies, 2020, pp. 1–7
<https://doi.org/10.1109/ICMIMT49010.2020.9041189>
- [4] Ulutan, D., Ozel, T.: Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011, vol. 51, no. 3, pp. 250–280
<https://doi.org/10.1016/J.IJMACHTOOLS.2010.11.003>
- [5] Thellaputta, G. R., Chandra, P. S., Rao, C. S. P.: Machinability of Nickel Based Superalloys: A Review, Materials Today: Proceedings, 2017, vol. 4, no. 2, pp. 3712–3721
<https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2017.02.266>
- [6] Szuperötvözet egykristályok – drágakövek a gázturbinákban | CNC, [online] Available at: <https://www.cnc.hu/2014/01/szuperotvozet-egykrystalok-dragakovek-a-gaszturbinakban/> [Accessed: 16. 12. 2022.]
- [7] Trent 800 | Rolls-Royce, [online] Available at: <https://www.rolls-royce.com/products-and-services/civil-aerospace/widebody/trent-800.aspx#/> [Accessed: 16. 12. 2022.]
- [8] The Rolls-Royce Trent Engine, [online] Available at: <https://slideplayer.com/slide/1603994/> [Accessed: 16. 12. 2022].
- [9] Choi, G. G., Kim, I. S., Kim, D. H., Seo, S. M., Jo, C. Y.: ETA PHASE FORMATION DURING THERMAL EXPOSURE AND ITS EFFECT ON MECHANICAL PROPERTIES IN NI-BASE SUPERALLOY GTD 111, Superalloys 2004 (Tenth International Symposium), 2004, pp. 163-171, [online] Available at: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/74176916/941f70f967850635f9a4189abbad6b4b135d-libre.pdf?1635986712=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3Deta_phase_formation_during_thermal_expos.pdf&Expires=1674153277&Signature=cMjhYq~9xfbtjsUeOh2dYcChO0DJqw6CfEPUiy8L1C3lhPH5c7qRwbh1AqPA1sGsL4O7KH2I9JXkexv18sL

[5delFzX-Yrug0z9wv3xkHRko3jZ-Rfzo0Xct-fOMjEVT5L34oJCyOM-IJZH4n6sNWUDGksi2feqxUyJD2c~EGCPaJVW8xC1mBOjm-HYakEprtNef8cn58gxtHx~i8pGXp2kTMBbgyNiZU6hgXeAhRnT1leQyMc9EEi2-9-9GWXm7qtMbk8jsIDruTvfJXtqfQwHS83b~BSSP066bvP7Wgf8~ydP3prta4CyqkNtuj6GLInnu-mBaitOebh2GRINo3A &Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA](https://doi.org/10.1016/j.jmact.2016.12.006) [Accessed: 17. 12. 2022.]

- [10] Kónya, G.: Nikkel-bázisú szuperötvözetek megmunkálhatósága, Gradus, 2022, vol. 9. no. 1, pp. 1-9
<https://doi.org/10.47833/2022.1.ENG.004>
- [11] Kodácsy, J., Kovács, Zs. F., Viharos, Zs. J.: A Ni-BÁZISÚ SZUPERÖTVÖZETEK MEGMUNKÁLHATÓSÁGA HORONYMARÁSKOR, Gradus, 2015, vol. 2, no. 2, pp. 142–146
- [12] 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, 2002, vol. 325, no. 1-2, pp. 484–489
[https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(01\)01709-9](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(01)01709-9)
- [13] Satyanarayana, D. V. V., Prasad, N. E.: Nickel-Based Superalloys, Aerospace Materials and Material Technologies, 2017, pp. 199–228
https://doi.org/10.1007/978-981-10-2134-3_9
- [14] Nickel Based Superalloys, [online] Available at: <http://www.phase-trans.msm.cam.ac.uk/2003/Superalloys/superalloys.html> [Accessed: 23. 05. 2022.]
- [15] Wang-Koh, Y. M.: Understanding the yield behaviour of L12-ordered alloys, Materials Science and Technology, 2016, vol. 33, no. 8, pp. 934–943
<http://dx.doi.org/10.1080/02670836.2016.1215961>
- [16] Ibanez, A. R., Srinivasan, V. S., Saxena, A.: Creep deformation and rupture behaviour of directionally solidified GTD 111 superalloy,” Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2006, vol. 29, no. 12, pp. 1010–1020
<https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.2006.01066.x>
- [17] Martin, E., Natarajan, A., Kottilingam, S., Batmaz, R.: Binder jetting of ‘Hard-to-Weld’ high gamma prime nickel-based superalloy RENÉ 108, Additive Manufacturing, 2021, vol. 39, p. 101894
<https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2021.101894>
- [18] Choi, B. G., Kim, I. S., Kim, D. H., Jo, C. Y.: Temperature dependence of MC decomposition behavior in Ni-base superalloy GTD 111, Materials Science and Engineering: A, 2008, vol. 478, no. 1–2, pp. 329–335
<https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2007.06.010>
- [19] Enayati, M.H., Sadeghian, Z., Salehi, M., Saidi, A.: The effect of milling parameters on the synthesis of Ni3Al intermetallic compound by mechanical alloying, Materials Science and Engineering: A, 2004, vol. 375-377, pp. 809-811
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.060>
- [20] Designing for Creep Resistance - Nickel Based Superalloys [online] Available at: https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/creep/creep_resistance.php [Accessed: 23. 05. 2022.]
- [21] Kowalewski Z. L., Ustrzycka, A.: Creep Deformation, Encyclopedia of Continuum Mechanics, 2020, pp. 499–508
https://doi.org/10.1007/978-3-662-55771-6_157
- [22] 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
<https://doi.org/10.1016/J.TRIBOINT.2022.107517>
- [23] Groove or slot milling, [online] Available at: <https://www.sandvik.coromant.com/en-us/knowledge/milling/groove-or-slot-milling> [Accessed: 27. 12. 2022.]
- [24] Szalóki, I., Csuka, S., Csesznok, S., Sipos, S.: CAN TROCHOIDAL MILLING BE IDEAL?, Manufacturing 2012 The XXI. Conference of GTE on Manufacturing and related technologies, 2012,
<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4235.7286>
- [25] Rauch, M., Duc, E., Hascoet, J. Y.: Improving trochoidal tool paths generation and implementation using process constraints modelling, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009, vol. 49, no. 5, pp. 375–383
<https://doi.org/10.1016/J.IJMACHTOOLS.2008.12.006>

- [26] Jacso, A., Matyasi, G., Szalay, T.: The fast constant engagement offsetting method for generating milling tool paths, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, vol. 103, no. 9–12, pp. 4293–4305
<https://doi.org/10.1007/s00170-019-03834-8>
- [27] Jacso, A., Matyasi, G., Szalay, T.: Trochoidal Tool Path Planning Method for Slot Milling with Constant Cutter Engagement, *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2021, pp. 659–668
https://doi.org/10.1007/978-981-33-4320-7_59
- [28] Santhakumar, J.: Effect of Various Tool Path Strategies on the Performance Parameters in Milling Process, 2022, Diss. SRM Institute of Science and Technology, 2022, Accessed: Dec. 27, 2022. [Online] Available at: <http://localhost/xmlui/handle/123456789/45131> [Accessed: 27. 12. 2022]
- [29] Potthoff N., Wiederkehr, P.: Fundamental investigations on wear evolution of machining Inconel 718, *Procedia CIRP*, 2021, vol. 99, pp. 171–176
<https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2021.03.024>
- [30] Rodriguez-Alabanda, O., Guerrero-Vaca, G., Molero, E., Romero, P. E.: Experimental analysis of deep slot milling in EN AW 2024-T3 alloy by stretched trochoidal toolpath and variable helix angle tool, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2021, vol. 35, pp. 346–360
<https://doi.org/10.1016/J.CIRPJ.2021.07.002>
- [31] Kónya, G.: NIKKEL-BÁZISÚ SZUPERÖTVÖZET FORGÁCSOLHATÓSÁGA EGYES CAM STRATÉGIÁK FÜGGVÉNYÉBEN HSC TARTOMÁNYBAN, 2022, vol. 9, no. 1
<https://doi.org/10.47833/2022.1.ENG.006>
- [32] Syafik, J. M., Razali, M. M., Azwan, S. S.: The Influence of Tool Geometry towards Cutting Performance in Machining Aluminium 7075, *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 97
<https://doi.org/10.1051/MATECCONF/20179701079>
- [33] Karagiannis, S., Stavropoulos, P., Ziogas, C., Kechagias, J.: Prediction of surface roughness magnitude in computer numerical controlled end milling processes using neural networks, by considering a set of influence parameters: An aluminium alloy 5083 case study, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2014, vol. 228, no. 2, pp. 233–244
<https://doi.org/10.1177/0954405413498582>
- [34] Kopac, J., Krajnik, P.: Robust design of flank milling parameters based on grey-Taguchi method, *Journal of Materials Processing Technology*, 2007 vol. 191, no. 1–3, pp. 400–403
<https://doi.org/10.1016/J.JMATPROTEC.2007.03.051>
- [35] Ku, H., Chia, W. C.: DESIGN OF MULTI-PURPOSE CARBIDE END MILL, *Journal-The Institution of Engineers*, 2006, vol. 67, no. 2, pp. 34-40, [online] Available at: http://dspace.unimap.edu.my/bitstream/handle/123456789/13621/034-040_carbide%20end%20mill.pdf.pdf?sequence=1 [Accessed: 27. 01. 2023]
- [36] Khanna, N., Agrawal, C., Pimenov, D. Y., Singla, A. K., Machado, A. R., da Silva, L. R. R., Gupta, M. K., Sarikaya, M., Krolczyk, G. M.: Review on design and development of cryogenic machining setups for heat resistant alloys and composites, *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, vol. 68, pp. 398–422,
<https://doi.org/10.1016/J.JMAPRO.2021.05.053>
- [37] Cryogenics | physics | Britannica, [online] Available at: <https://www.britannica.com/science/cryogenics> [Accessed: 15. 05. 2022.]
- [38] Kumar, G. H., Mohit, H., Purohit, R.: Effect of Deep Cryogenic Treatment on Composite Material for Automotive Ac System, *Materials Today: Proceedings*, 2017, vol. 4, no. 2, pp. 3501–3505
<https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2017.02.240>
- [39] Kale, A., Khanna, N.: A Review on Cryogenic Machining of Super Alloys Used in Aerospace Industry *Procedia Manufacturing*, 2017, vol. 7, pp. 191–197
<https://doi.org/10.1016/J.PROMFG.2016.12.047>
- [40] Deshpande, S., Deshpande, Y.: A review on cooling systems used in machining processes, *Materials Today: Proceedings*, 2019, vol. 18, pp. 5019–5031
<https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2019.07.496>
- [41] Cordes, S., Hübner, F., Schaarschmidt, T.: Next generation high performance cutting by use of carbon dioxide as cryogenics, *Procedia CIRP*, 2014, vol. 14, pp. 401–405
<https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2014.03.091>

- [42] Braton, N. R.: Cryogenic Recycling and Processing [online] Available at: https://books.google.hu/books?hl=hu&lr=&id=TEYPEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA39&dq=cryogen+in+milling+&ots=hl nWuStwnA&sig=NCLbdkFAPi8vXGY-ZcJ6RqvFINo&redir_esc=y#v=onepage&q=cryogen%20in%20milling&f=false [Accessed: 14. 05. 2022.]
- [43] Jebaraj, M., Pradeep, K. M., Anburaj, R.: Effect of LN2 and CO2 coolants in milling of 55NiCrMoV7 steel, Journal of Manufacturing Processes, 2020, vol. 53, pp. 318–327
<https://doi.org/10.1016/J.JMAPRO.2020.02.040>
- [44] Kalsi, N. S., Sehgal, R., Sharma, V. S.: Cryogenic Treatment of Tool Materials: A Review, Materials and Manufacturing Processes, 2010, vol. 25, no. 10, pp. 1077–1100
<https://doi.org/10.1080/10426911003720862>
- [45] Aramcharoen, A., Chuan, S. K.: An Experimental Investigation on Cryogenic Milling of Inconel 718 and its Sustainability Assessment, Procedia CIRP, 2014, vol. 14, pp. 529–534
<https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2014.03.076>
- [46] Hong, S.: LUBRICATION MECHANISMS OF LN2 IN ECOLOGICAL CRYOGENIC MACHINING, Machining Science and Technology, 2007, vol. 10, no. 1, pp. 133–155
<https://doi.org/10.1080/10910340500534324>
- [47] LOVÁSZ Forgácsoló Kft.: Keményfém maró katalógus BZL001, [online] Available at: https://lovaszkft.hu/wp-content/uploads/2021/01/Lov%C3%A1sz-BZL-katal%C3%B3gus_21_2.pdf [Accessed: 28. 01. 2023]