



GTD-111 típusú, nikkelbázisú szuperötvözet forgácsolhatóságának vizsgálata homlokmarás során

Investigation of the Machinability of GTD-111 Type Nickel-Base Superalloy During Face Milling

Kónya Gábor¹, Szabó Norbert, Kovács Zsolt Ferenc

Neumann János Egyetem, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék, Kecskemét, Magyarország, ¹konya.gabor@gamf.uni-neumann.hu

Abstract

In this paper, the authors investigate the effect of technological parameters on the face milling of GTD-111 type nickel-base superalloys. These alloys are among the most difficult to machine and are widely used as a base material for gas turbine components in the aerospace and energy industries. The aim of this paper is to determine, using the Taguchi method, those parameters that have the greatest influence on cutting force and tool wear. A rotary force meter was used to measure the cutting force and cutting torque, and then the inserts used were examined under a microscope. Results show that feed per tooth has the greatest effect on cutting forces and tool wear. In order to avoid the formation of edge deposits, it is advisable to use higher cutting speeds and compressed air cooling.

Keywords: *nickel-base superalloy, face milling, cutting force, cutting torque, tool wear, ceramic tool.*

Összefoglalás

Jelen publikációban a technológiai paraméterek hatásainak vizsgálatával foglalkoztunk GTD-111 típusú nikkelbázisú szuperötvözet homlokmarása során. Ezek az ötvözetek a legnehezebben megmunkálható anyagok közé tartoznak, melyeket széles körben használnak a repülőgép- és energetikai iparban használatos gázturbina-alkatrészek alapanyagaként. A kutatás célja Taquchi-módszerrel meghatározni, hogy mely paraméterek vannak legnagyobb hatással a forgácsolóerőre és a szerszámkopásra. A forgácsolóerő méréséhez forgó erőmérőt használtunk, mellyel a forgácsolási erő és forgácsolási nyomaték mérhető, majd a használt lapkákat mikroszkóppal vizsgáltuk. Eredményül látható, hogy a fogankénti előtolásnak van a legnagyobb hatása a forgácsolóerőkre és a szerszám-tönkremenetelre. Az élrátétképződés elkerülése érdekében érdemes a nagyobb forgácsolósebesség használata, valamint javallott a sűrített levegős hűtés alkalmazása.

Kulcsszavak: *nikkelbázisú szuperötvözet, homlokmarás, forgácsolási erő, nyomaték, szerszámkopás, kerámiaszerszám.*

1. Bevezetés

A szakirodalom négy típusú szuperötvözetet különböztet meg, a nikkel-, a kobalt-, a vas- és a titánbázisú szuperötvözeteket [1]. Ezek közül elsősorban a nikkelbázisú szuperötvözeteket használják a repülőgép- és energetikai iparban működő gázturbinákban, mert kedvező mechanikai és fizikai tulajdonságaikat nagy hőmérsékleten is biztosítják [2, 3]. Főleg a gázturbinák nagy hő-

mérsékletű zónáiban használják ezen ötvözeteket (1. ábra), ahol az üzemi hőmérséklet eléri az 1400–1500 °C-ot, míg az üzemi nyomás a 40 bar-t, s mindezt extrém korrozív környezetben, miközben az üzemi fordulatszám meghaladja a 10 000 1/min-t [4]. Ez az extrém nagy hőmérséklet a gázturbinák hatásfokának növeléséhez szükséges, hiszen a többi hőerőgéphez hasonlóan a hatásfok úgy növelhető, ha a munkaközeg maximum

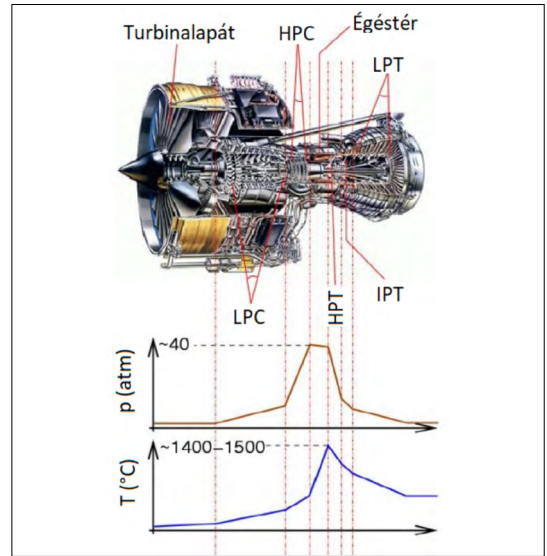
és minimum hőmérséklete közötti különbséget növeljük, ennek köszönhetően a mai gázturbinák hatásfoka megközelíti a 60%-ot [5].

Valamennyi szuperötvözet közös jellemzője a nagy melegszilárdság, a rossz hővezető képesség, a hő- és korrózióállóság. A belőlük készült alkatrészeket gyakran forgácsolással állítják elő annak ellenére, hogy tulajdonságaik alapján a különösen nehezen megmunkálható anyagok közé tartoznak [6]. Jelen kutatásban a GTD-111 típusú, nikkelbázisú szuperötvözet forgácsolhatóságának vizsgálatával foglalkoztunk homlokmarás során, mely ötvözetnek a megmunkálhatósága lényegesen rosszabb, mint a mai kutatásokban általánosan vizsgált Inconel 718-é. Az 1. táblázatban a GTD-111, az Inconel 718 és a referenci anyagként bemutatott, széles körben ismert C45 acél mechanikai és fizikai tulajdonságainak összehasonlítása látható. A tulajdonságokból adódóan a GTD-111 forgácsolása lényegesen nehezebb feladat, mint a kutatásokban általánosságban vizsgált Inconel 718-é, a C45-tel összehasonlítva a GTD-111 szakítószilárdsága több mint kétszerese, a hővezető képessége pedig csak a negyede.

A GTD-111 folyáshatárának és nyúlásának hőmérsékletfüggése a 2. ábrán tekinthető meg. Látható, hogy tulajdonságaikat nagyon nagy hőmérsékleten is megtartják, emiatt válnak oly nehezen forgácsolhatóvá [7], mivel a nagy szilárdságnak köszönhetően nagy nyíróerők ébrednek a forgácsolási zónában. A megmunkálás során keletkező nagy hőmennyiség a rossz hővezető képesség miatt nem tud a forgácsba és a munkadarabba távozni, ennek következtében a szerszám élén fog koncentrálni. Ennek hatására a szerszámok gyorsan kopnak, és gyakoriak a törések.

A megmunkálási idő rendkívül fontos a gyártásban, egyre nagyobb az igény a költséghatékony és környezetbarát megmunkálási módokra. Ez a tendencia megmutatkozik a nagy sebességű forgácsolás és keményforgácsolás elterjedésének képeben. Nemcsak a nikkelbázisú szuperötvözetek anyagtulajdonságaiból, hanem a technológiából is adódóan a gyorsacél és a forrasztott lapkás szerszámok nem alkalmasak az igények kielégítésére, így ezen a területen megjelentek a keményfém, a kerámia, a CBN (kőbős bór-nitrid) és gyémánt szerszámanyagok.

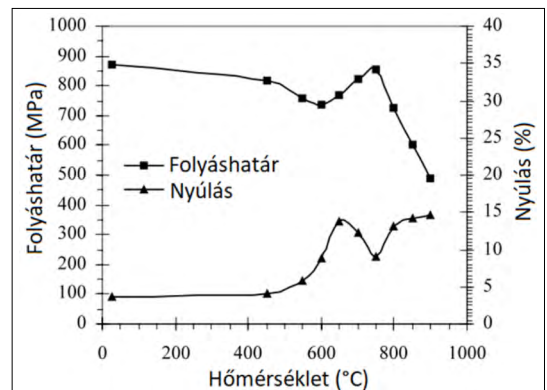
A Ni-ötvözetek forgácsolása során a legtöbb esetben keményfém szerszámokat használnak bevonat nélkül, illetve különféle bevonatokat gazdasági és technológiai korlátok miatt. Ez főképp a horonymarás, illetve egyéb, zárt alakzatok esetén mutatkozik meg, melyek megmunkálásához



1. ábra. Gázturбина, amely a különböző szakaszokat mutatja a hőmérsékleti és nyomásviszonyokkal (a [8] nyomán) (HPC – nagynyomású kompresszor rész; HPT – nagynyomású turbína)

1. táblázat. A GTD-111, az Inconel 718 és a C45 acél 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
Hővezető képesség λ (W/(m·K))	12,56	11,2	45,35



2. ábra. A GTD-111 folyáshatárának és nyúlásának hőmérsékletfüggése (a [11] nyomán)

szükséges kerámiaszerszámok csak nemrégiben jelentek meg a piacon, ráadásul csak igen magas áron érhetők el. Síkfelületek megmunkálása esetén szélesebb körben alkalmazzák a cserélhető lapkás homlokmarókat.

A kerámia forgácsolószerszám alkalmazása a jó tulajdonságai miatt indokolt, mint például nagy melegkeménység, jó kopásállóság, kis hővezető képesség és kiváló kémiai stabilitás [12]. Emiatt a szuperötvözetek forgácsolásához jó választás lehet, mivel azon a hőmérsékleten tudjuk használni, amelyen ezen ötvözetek már kilágyulnak, ezáltal a forgácsolási erő lecsökken, így a szerszámanyag kis hajlítózsilárdsága nem okoz problémát.

E kutatásban GTD-111 típusú, nikkelbázisú szuperötvözet horonymarása során alkalmazott technológiai paraméterek hatásait vizsgáltuk a fellépő forgácsolási erőkre és a lapkatönkrementelekre nézve. A cél: megtalálni azon paraméterkombinációt, mely a legkisebb szerszámterhelést és szerszámkopást eredményezi.

2. A kísérlet módszertana

E fejezetben a kísérlethez használt szerszámgép, mérőberendezések, forgácsolószerszám és a kísérlettervezés módszertanát ismertetjük.

2.1. Kísérleti környezet

A keménymarás extrém igénybevételnek teszi ki a szerszámgépet, így egy robusztus és merev szerszámgépre van szükség, ezért az NCT EmL-850D megmunkálóközpontra esett a választás.

A forgácsolási nyomaték méréséhez KISTLER 9125A24 típusú forgó erőmérőt használtunk, míg a jelfeldolgozáshoz KISTLER 5697 típusú jelfeldolgozó egységet. Az eredmények rögzítése DynoWare® szoftverrel, a kiértékelése pedig Origin-Pro 2021® szoftverrel történt. A kísérleti összeállítás a **3. ábrán** látható.

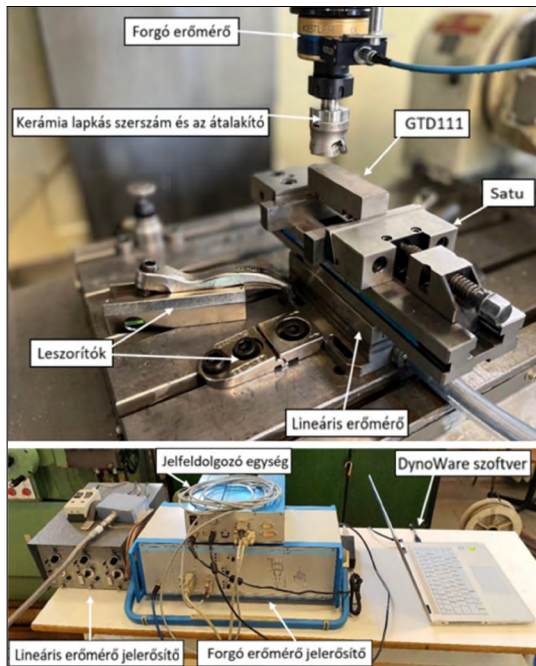
A nyomaték mérőbe a szerszámot patronos befogással lehet befogni, a homlokmaró azonban marótüskés felfogást igényel, ezért egy speciális közdarabot gyártottunk le (**4. ábra**).

2.2. A kísérlethez használt szerszám

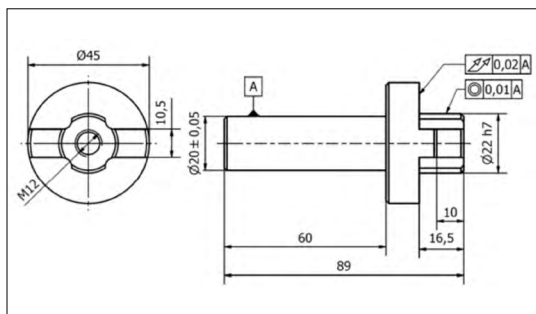
A kísérlethez TaeguTec BNGX 0904 CH-E04 típusú kerámialapkát és TaeguTec TFMBN 350-22R09CH típusú, Ø40 mm-es homlokmarót használtunk (**5. ábra**).

2.3. A kísérlethez használt technológiai paraméterek

A kísérletek elvégzése Taguchi-kísérletterv alapján történt, mely a Minitab17 szoftverrel készült.



3. ábra. Kísérleti összeállítás



4. ábra. A szerszám felfogásához szükséges közdarab műhelyrajza



5. ábra. A kísérlethez használt szerszám tartó és lapka

A meghatározott faktorok és szintek a **2. táblázat**-ban, a kísérletterv a **3. táblázat**-ban látható. Az alkalmazott technológiai paraméterek kiválasztása a gyártói ajánlás alapján történt.

A kísérletek során ellenirányú marással dolgoztunk. A kerámiaszerszámokkal történő forgácsolás esetén, főleg nehezen forgácsolható anyagokban, káros az egyenirányú marás, mivel ilyenkor a fog maximális forgácsvastagságot igyekszik leválasztani. Ez ütésszerű igénybevételként hat a szerszámra, mely a kis hajlítózsilárdsága miatt hamarabb tönkremegy. Az ellenirányú marásnál a fogásvétel nulla forgácsvastagsággal kezdődik, lényegében a szerszám vastagsága kissé az anyagot, aminek a következtében nagyobb lesz a forgácsolási zóna hőmérséklete.

A forgácsolóelválasztási ívet tapasztalati érteken határoztuk meg, melynek értéke 70° . Az ehhez kapcsolódó forgácsolási szélesség 16,5 mm. A megmunkált hossz 130 mm minden kísérlet esetén.

2. táblázat. A kísérlettervezés során meghatározott marási faktorok és szintek

Marási faktorok		Szintek		
		1.	2.	3.
A	Forgácsolási sebesség, v_c (m/min)	600	900	1200
B	Fogankénti előtolás, f_z (mm/fog)	0,15	0,25	0,35
C	Fogásmélység, a_p (mm)	0,5	0,75	1

3. táblázat. A kísérletek során végrehajtott kísérletterv

Kísérletek sorszáma	a_p (mm)	f_z (mm/fog)	v_c (m/min)
1.	0,5	0,15	600
2.	0,5	0,25	900
3.	0,5	0,35	1200
4.	0,75	0,15	600
5.	0,75	0,25	900
6.	0,75	0,35	1200
7.	1	0,15	600
8.	1	0,25	900
9.	1	0,35	1200

3. Eredmények

Ebben a fejezetben a kísérlet során kapott eredményeket ismertetjük. A 3., a 6. és a 9. kísérlet hibás, mert nem került kiszámolásra a forgácsolási sebesség és az előtolási sebesség viszonya, így a megmunkálás során szembesültünk azzal, hogy az előtolási sebesség nagyobb volt, mint a forgácsolási sebesség. Ennek következtében a szerszámtest megsérült, ahogyan az a **6. ábrán** megfigyelhető. Így a 3., 6. és 9. kísérlet nem értékelhető.

3.1. A forgácsolási erők és nyomatékok

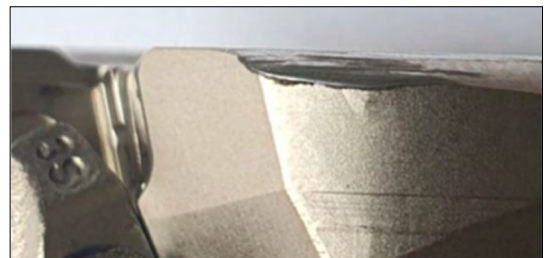
A kísérletek során mért, „z” irányú forgácsolási erők a **7–9. ábrán**, míg a forgácsolási nyomatékok a **10–12. ábrán** tekinthetők meg.

A **7–12. ábrán** látható mérési eredmények alapján megállapítható, hogy általánosan a forgácsolási erő és nyomaték egyenesen arányosan nő a fogásmélység és a fogankénti előtolás növelésével. A legkisebb szerszámterhelés az 1. kísérlet esetében figyelhető meg, míg a legnagyobb az 5. kísérlet esetén. Megállapítható, hogy legnagyobb hatása a fogankénti előtolásnak van a szerszámterhelésre nézve.

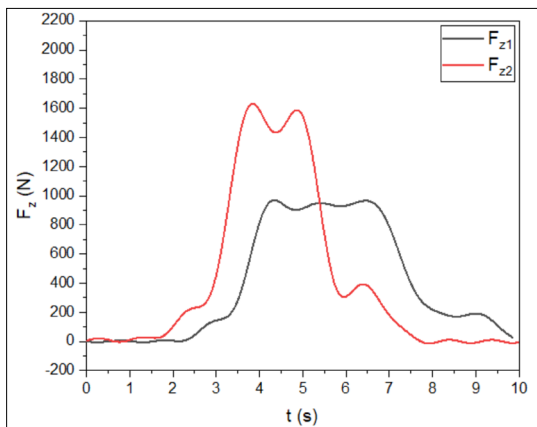
3.2. A forgácsolólapkák vizsgálata

A megmunkálás során használt lapkákról készült felvételek a **13. ábrán** láthatók. A megmunkálás során az élrátét keletkezése jellemző volt a szerszámél mentén, illetve némi kopás is megfigyelhető. Egy lapka eltört, nagy valószínűséggel a megmunkálás során ütésszerű hatás érte.

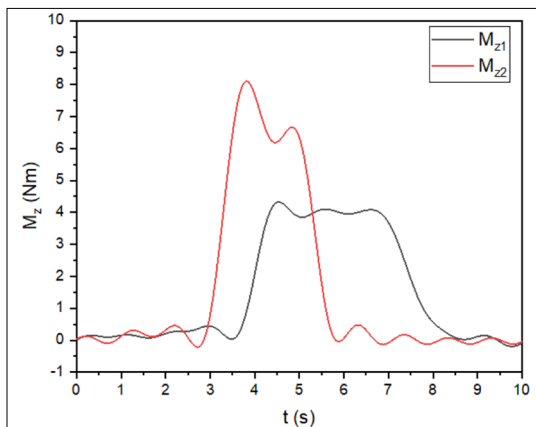
Az élrátét mértéke jelentősen csökkenthető lenne, ha sűrített levegős hűtés alkalmazására sor került volna a forgácsolóelválasztás javítása érdekében. Erre a célra a szerszámtestben vannak furatok kialakítva, azonban a kutatáshoz használt szerszám gép nem alkalmas ilyen hűtés használatára. Tapasztalok alapján a nagyobb forgácsolási sebesség alkalmazása a célszerű.



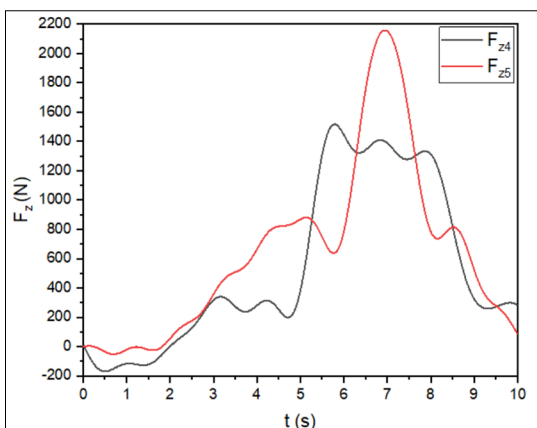
6. ábra. Sérült szerszámtest



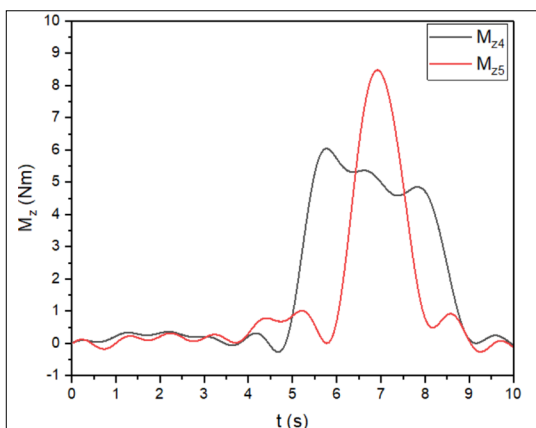
7. ábra. Az 1. és a 2. kísérlet során mért F_z forgácsolási erő a megmunkálási idő függvényében



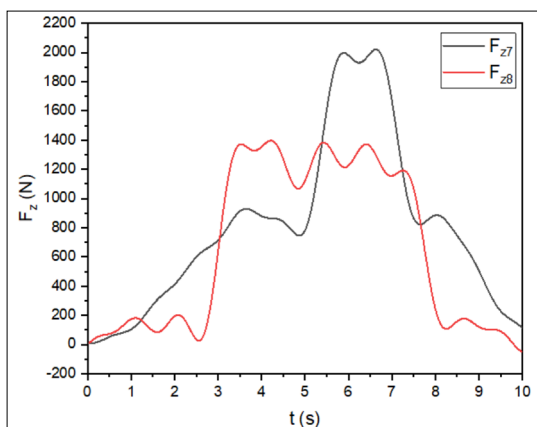
10. ábra. Az 1. és a 2. kísérlet során mért M_z forgácsolási nyomaték a megmunkálási idő függvényében



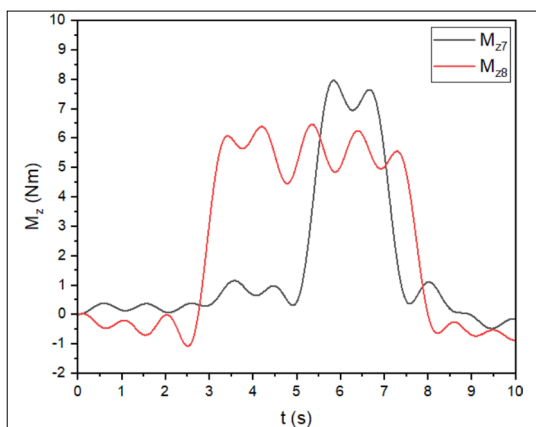
8. ábra. A 4. és az 5. kísérlet során mért F_z forgácsolási erő a megmunkálási idő függvényében



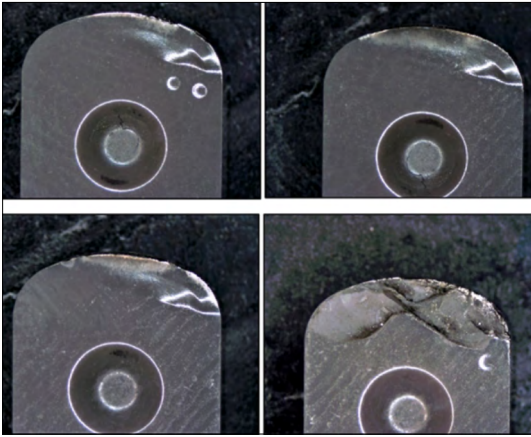
11. ábra. A 4. és az 5. kísérlet során mért M_z forgácsolási nyomaték a megmunkálási idő függvényében



9. ábra. A 7. és a 8. kísérlet során mért F_z forgácsolási erő a megmunkálási idő függvényében



12. ábra. A 7. és a 8. kísérlet során mért M_z forgácsolási nyomaték a megmunkálási idő függvényében



13. ábra. A forgácsolási kísérletek során használt lapkák felülnézeti képe

4. Összegzés

A kutatás során GTD-111 típusú, nikkeltázasú szuperötvözet forgácsolhatóságát vizsgálták homlokmaráskor. Taguchi-módszer segítségével kísérletterv készült, majd a kísérletek végrehajtásakor mértük a fellépő forgácsolási erőt és nyomatékot. A következő következtetéseket lehet levonni a kísérletek kiértékelésével:

- a kísérletek végrehajtása előtt célszerű ellenőrizni a kísérletterv helyességét;
- a technológiai paraméterek közül a fogankénti előtolásnak van a legnagyobb hatása a megmunkálási folyamatra;
- az élrátétképződés elkerülése érdekében érdemes a nagyobb forgácsolási sebesség használata;
- kerámia szerszám használata esetén ajánlott a sűrített levegős hűtés alkalmazása.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Thellaputta G. R., Chandra P. S., Rao C. S. P.: *Machining of Nickel Based Superalloys: A Review*. Materials Today: Proceedings, 4/2. (2017) 3712–3721. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2017.02.266>
- [2] Kun K., Kodácsy J., Vaczó D., Kovács Zs. F.: *Machining of Ni-based Superalloys by Indexable End Mills*. Acta Materialia Transylvanica, 2/1. (2019) 49–54. <https://doi.org/10.33924/amt-2019-01-08>
- [3] Ulatan D., Ozel T.: *Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 51/3. (2011) 250–280. <https://doi.org/10.1016/J.IJMACH-TOOLS.2010.11.003>
- [4] Olufayo O. A., Boulaares D. M., 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, ICMIMT 2020. South Africa, 2020. 1–7. <https://doi.org/10.1109/ICMIMT49010.2020.9041189>
- [5] CNC Media, *Szuperötvözetek egykristályok – drágakövek a gázturbinákban*. (letöltve: 2023. 02. 07.) <https://www.cnc.hu/2014/01/szuperotvozet-egykrystalok-dragakovek-a-gaszturbinakban/>
- [6] Kodácsy J., Kovács Zs. F., Viharos Zs. J.: *A Ni-bázisú szuperötvözetek megmunkálhatósága horonymaráskor*. Gradus, 2/2. (2015) 142–146.
- [7] Kónya G., Kovács Zs. 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 (CINTI-MACRO), Magyarország, 2022. 1–6. <https://doi.org/10.1109/CINTI-MACRO57952.2022.10029453>
- [8] Sourmail T.: *Coatings for Turbine Blades*. 2003. <http://servidor.demec.ufpr.br/disciplinas/EME715/AT%20PGMEC/Artigos%20para%20Semin%C3%A1rio/artigo%20cambridge%20coatings.pdf> (letöltve: 2023. február 3.)
- [9] Kodácsy J., Viharos Zs. J., Kovács Zs. F.: *A forgácsolhatóság meghatározásának módszerei Ni-bázisú szuperötvözetek horonymaráskor*. Gépgyártás, szaklap különszám, 15/2. (2015) 125–129.
- [10] Zhang B. Y., Zeng Y. N., Pang X., Li S. Q., Liu X., Deng W. J.: *Feasibility analysis and process characteristics of selective laser ablation assisted milling Inconel 718*. Advances in Manufacturing, 10. (2022) 495–519. <https://doi.org/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, 325/1–2. (2022) 484–489. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(01\)01709-9](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(01)01709-9)
- [12] Diniz A. E., Ferrer J. A. G.: *A comparison between silicon nitride-based ceramic and coated carbide tools in the face milling of irregular surfaces*. Journal of Materials Processing Technology, 206/1–3. (2008) 294–304. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.12.035>