

A NIKKEL-BÁZISÚ SZUPERÖTVÖZETEK FORGÁCSOLHATÓSÁGI VIZSGÁLATAINAK GAZDASÁGI HÁTTERE

THE ECONOMICS OF MACHINABILITY TESTING OF NICKEL-BASED SUPERALLOYS

Kónya Gábor^{1*} 0000-0003-1531-5921

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

<https://doi.org/10.47833/2023.2.ENG.002>

Kulcsszavak:

Nikkel-bázisú szuperötvözetek
Horonymarás
Szerszáméltartam
Gazdasági kutatás
Alap kutatás

Keywords:

Nickel-based superalloys
Slot milling
Tool life
Economical research
Fundamental research

Cikktörténet:

Beérkezett 2022. október 10.
Átdolgozva 2023. április 16.
Elfogadva 2023. szeptember 7.

Összefoglalás

Egy kutatás sikerességét jelentős mértékben befolyásolja, hogy van-e mögötte megfelelő gazdasági háttér, valamint mennyire fontos az ipar számára a megoldandó feladat. Jelen publikációban feltárom a Nikkel-bázisú szuperötvözetek forgácsolhatóságának problémakörét, naprakészességét és gazdasági aktualitását. Kifejtésre kerül, hogy mely tényezők befolyásolják a szerszáméltartamot, valamint miért fontos a gazdasági érdekeken felül a minél hosszabb éltartam elérése.

Abstract

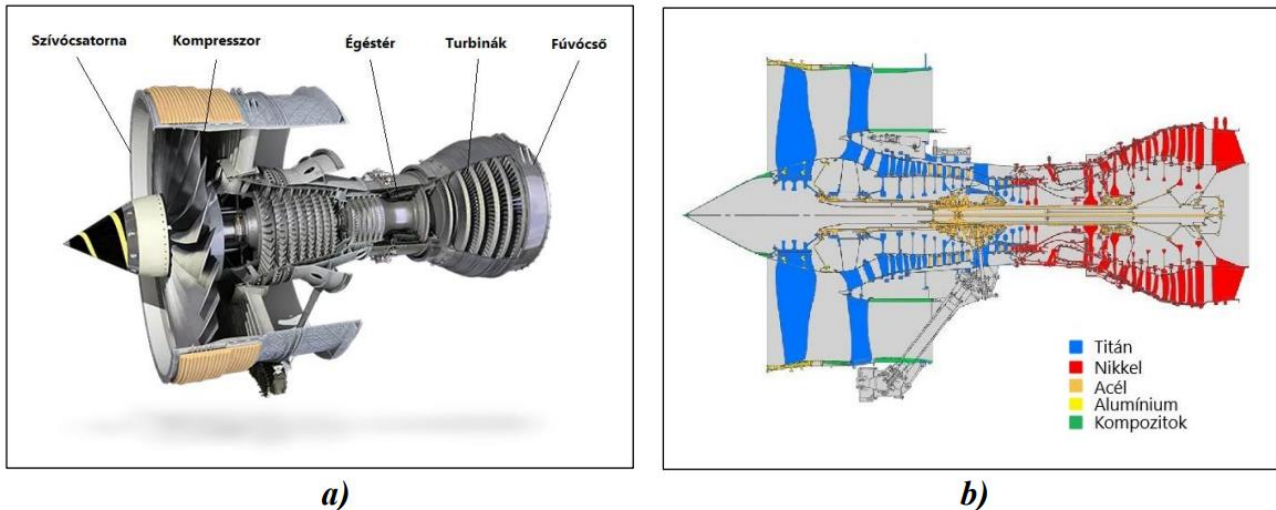
The success of a research project depends to a large extent on whether it has the right economic background and how important the task is to industry. In this paper, the problems, timeliness and economic relevance of the machinability of nickel-based superalloys are explored. The factors that influence tool life and why it is important to achieve the longest possible tool life in addition to economic interests will be discussed.

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 égésterben, 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 melegsziárdság, a kúszással, a hő- és korrózióállósággal szemben való ellenállás. 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, továbbá gyakoriak a törések is.

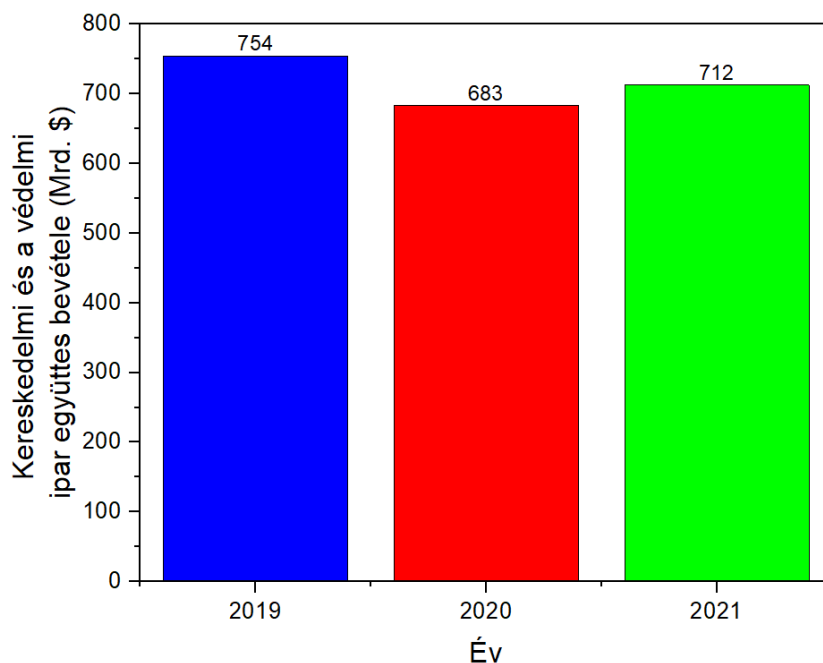
* Kónya Gábor
E-mail cím: konya.gabor@gamf.uni-neumann.hu



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

2. Kutatást megalapozó gazdasági környezet

Doktori kutatásomban a Nikkel-bázisú szuperötvözetek forgácsolhatóságának vizsgálatával foglalkozom, így fontos kérdés gazdasági háttér megvizsgálása is, hiszen a kutatás eredményességét, lehetőségét jelentős mértékben befolyásolja, hogy mik a jelenlegi piaci trendek, melynek függvényében fordítanak forrásokat a kutatás-fejlesztésre az ipari szereplők. A repülőgépipart, ahogyan a 2. ábrán is látható, mint ahogy szinte minden más iparágat is hátrányosan érintette a Covid-19 világjárvány, mivel az országok lezárták határaikat, így lényegében a légiutasszállítás teljesen leállt, továbbá a légi szállítás forgalma is jelentősen visszaesett a különböző ellátási lánc problémák miatt. Azonban a 2020 évi mélypont után ismét egy emelkedés figyelhető meg a bevételek terén 2021-ben. Ez két dologból tevődik össze, egyrészt a kereskedelem kezdi kiheverni a világjárvány okozta problémákat, másrészt a védelmiipar jelentős összegeket fektet hadiipari fejlesztésbe az orosz-ukrán konfliktus kapcsán [9].

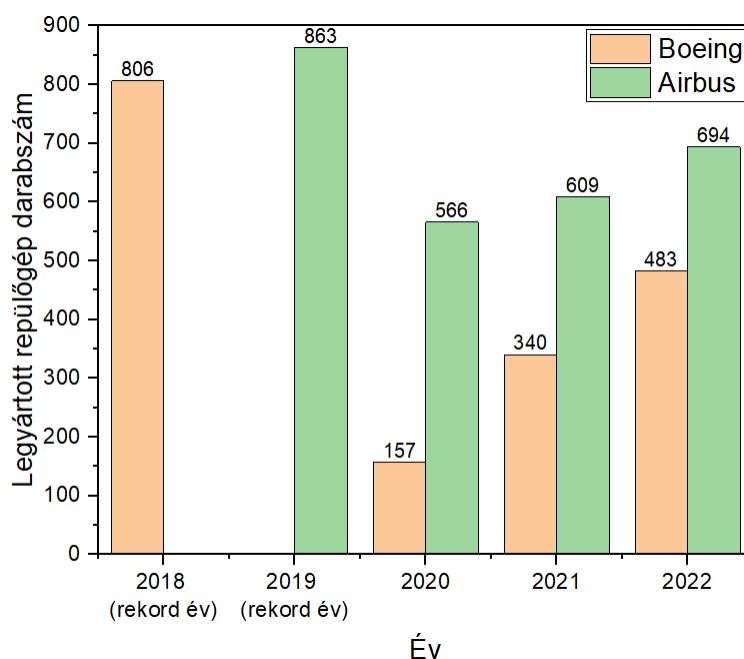


2. ábra: A kereskedelmi- és védelmi ipar együttes bevétele az elmúlt években (PwC elemzése alapján) [9]

A 3. ábrán a két legjelentősebb civil célokot szolgáló repülőgépgyártó, a Boeing és az Airbus által gyártott repülőgépdarabszám látható az elmúlt években. 2020-ban itt is jelentős visszaesés látható, azonban a 2021-es adat, illetve a 2022-ben előre jelzett darabszámok alapján az iparág újból erőre kap. Előrejelzések alapján 2023-ban a légiforgalom eléri a 2019-es szintet, még 2024-ben meg is haladja azt. Ennek főbb okai, hogy az országok feloldották az utazási korlátozásokat, az ellátási láncok helyreállni látszanak. További előrejelzések alapján 2030-ra a globális középosztály kb. 60%-ra nő, mely további több milliárd potenciális repülő ügyfelet jelent, továbbá a jelen társadalom 82%-a még sosem utazott repülőgépen [9].

Emellett a hadászati célú repülőgépek gyártásának volumene is növekszik, mivel az orosz-ukrán konfliktus nem egyhamar látszik megoldottnak [10]. Az Egyesült Államok költségvetése jövőre 872 mrd. \$-t fog előreláthatóan költeni hadiipari fejlesztésekre, ez az összeg 8%-kal több, mint a 2022-ben erre a célra fordított összeg. Egyes tagállamok szerint ezen összeg emelésének intenzitását növelni kellene [9].

Harmadik fő indok az iparág növekedésére, hogy a háborús konfliktus miatt a szolgáltatók a repülési útvonalakat Oroszország kikerülésével szervezik meg. Emiatt az egységnyi leszállított árura vetített karbantartási költség jelentős mértékben emelkedni fog, és a gyártás során nem csak az új turbinákra kell gondolni, hanem a felújításra szorulóakra is. Ez az emelkedő tendencia jelentős nyomást fog gyakorolni a gyártó vállalatokra, akik már most hatalmas beruházásokba kezdenek, hogy ezt a megnövekedő igényt ki tudják majd elégíteni. Ez a kialakult gazdasági környezet kiváló teret teremt kutatásomnak, hiszen még inkább meg fog növekedni az igény a gyorsabb, rugalmasabb és gazdaságosabb gyártási eljárások iránt.



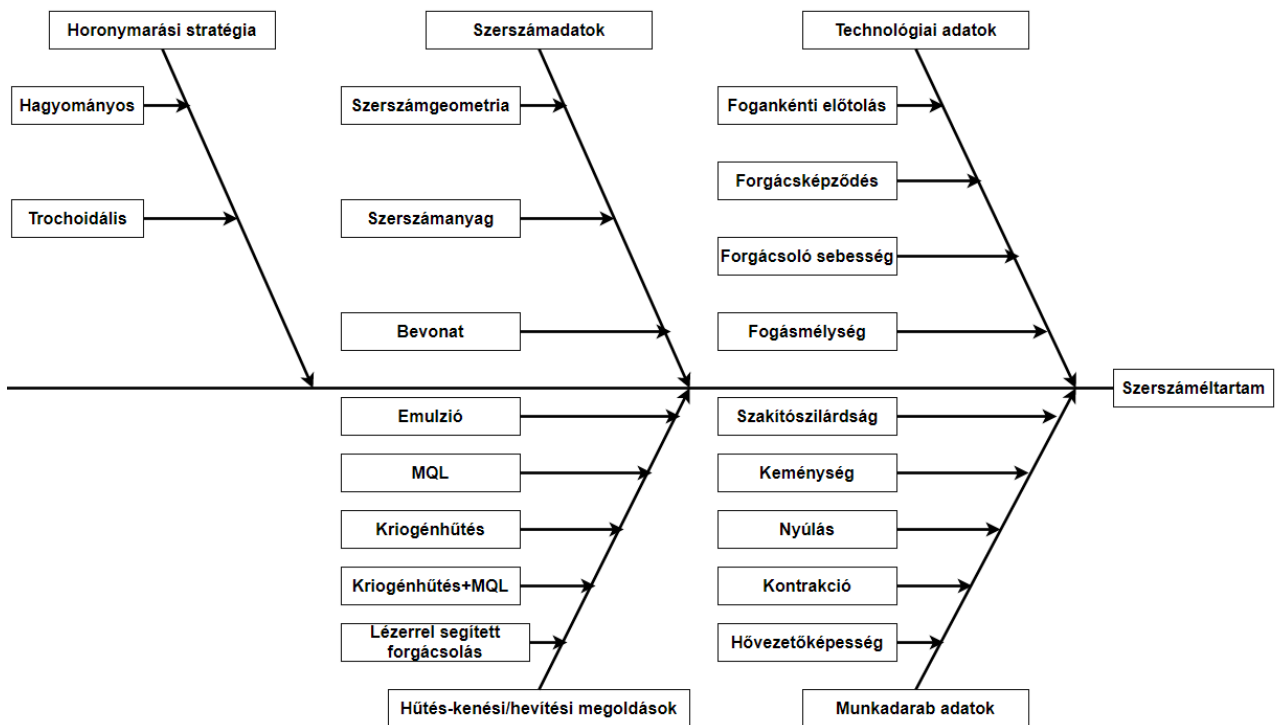
3. ábra: Legyártott kereskedelmi célú repülőgépek darabszáma az évek függvényében (PwC elemzése alapján) [9]

3. Gyártás költségét befolyásoló tényezők

Ahhoz, hogy a gyártás költségét befolyásoló tényezőkről beszélni lehessen, fel kell tárni minden olyan körülményt, mely befolyásolja azt [11]. Ehhez először ki kell tűzni egy célt, hogy mit szeretnénk fejleszteni és mik a célt befolyásoló tényezők. Doktori dolgozatomban a fő cél a szerszáméltartam növelése a gazdasági szempontok figyelembevételével. Ehhez készítettem el a 4. ábrán látható Ishikawa-diagramot, mely feltüntet minden olyan adatot, mely a szerszáméltartamot befolyásolhatja.

A kutatás elsősorban a horony-és zsebmarás problémáira tér ki, mivel az ipari tapasztalatok alapján ezek az alakcsatlakozások okozzák a legnagyobb problémát az ipar számára. A munkadarab tulajdonságok jelentős mértékben befolyásolják a megmunkálhatóságot. Ezen ötvözeteknél a nagy

szakítószilárdság és a megmunkálás során létrejövő felkeményedés a forgácsoló szerszámok deformációját okozzák a forgácsolás során, emellett nagyon erős abrazív kopásnak vannak kitéve a kemény MC (Metal Carbide) által. Továbbá az alacsony hővezetőképesség miatt a forgácsoló szerszám élein fog koncentrálni az 1000 °C körüli forgácsolási hőmérséklet. Ezen tényezők miatt a megfelelő hűtő-kenő eljárás és szerszám kombináció megválasztása, fejlesztése nélkülözhetetlen, ha nagy mértékű hatékonyságot szeretnénk elérni. Ezzel a területtel, főleg a szerszámtervezéssel, a piaci szereplőkön kívül csak nagyon kevesen foglalkoznak. Technológiai adatok vizsgálatával nagyon sokan foglalkoznak, ismertek is az általános tendenciák, ennek vizsgálata az új szerszámgeometria tesztelése során lesz nagy jelentősége. Ezen ötvözetek horonymarásához a megfelelő stratégia megválasztása nélkülözhetetlen. A jó stratégia nagy mértékben tudja csökkenteni a szerszámra ható dinamikus terhelések mértékét, ezzel pedig jelentősen tudja növelni az éltartamát.



4. ábra: Szerszáméltartam Ishikawa diagramja horonymarás során

3.1. Alapanyag

A GTD-111 típusú Nikkel-bázisú szuperötvözetek forgácsolhatóságával foglalkozom, melyeket elsősorban gázturbina lapátok anyagként alkalmaznak. A forgórész szegmensekből épül fel, ahogyan az 5. ábrán látható.



5. ábra: Gázturbina forgórész felépítése [12]

Ezeket a szegmenseket speciális vákuumöntéssel állítják elő, majd köszörüléssel és marással készre munkálják a funkcionális felületeket. Egy darab szegmens ára mérettől függően 20 000 – 50 000 \$ között van megmunkálás nélkül, továbbá e típusú szuperötvözetre jellemző, hogy nagyon nehezen, vagy egyáltalán nem hegeszthetők, így a hibázás nem megengedett a forgácsolás során, ezért stabil forgácsolási eljárásokra van szükség.

Az anyagjellemzők jelentős mértékben rontják a forgácsolási folyamatot. A szerszáméltartamra befolyással van a nagy keménység, a felkeményedés és az alacsony hővezető képesség. A forgácsoló erőket szintén növeli a nagy keménység és a szakítószilárdság. A forgácsolási hőmérsékletet befolyásolja a felkeményedés, a szakítószilárdság és a rossz hővezetőképeség. A felületminőségre alapvetően a felkeményedés van csak hatással [13].

3.2. Technológiai adatok, horonymarási stratégiák, hűtés-kenési/hevítési megoldások

Számos kutatás készült, melyben a forgácsolási adatokat és stratégiákat vizsgálták horonymarási műveletek során. Karmiris-Obratanski és munkatársai (2022) munkájukban Incoloy 800 H típusú alapanyag kapcsán a fogankénti előtolás és az oldallépés értékének hatásait vizsgálták három hűtés-kenési eljárás mellett, száraz, emulziós és minimálkenés (MQL) esetén. Minden esetben a száraz megmunkálás eredményezte a legnagyobb forgácsoló erőket, ezt követte az emulziós, majd a minimálkenéses eljárás. A fogankénti előtolás növelésének értéke jelentősen növelte a forgácsolóerőket és az energiafogyasztást, az oldallépésnek jelentősen nem befolyásolta azokat. Az anyagleválasztási teljesítmény egyenesen arányos a fogankénti előtolással, a felület minőség kisebb előtolás és oldallépés esetén a kedvezőbb [14].

Potthof és munkatársa (2021) Inconel 718 Ni-bázisú szuperötvözet kapcsán a telibemarás és a trochoidális marás során fellépő forgácsoló erőket és szerszámkopásokat vizsgálta száraz és emulziós megmunkálás esetén. A definíció szerint a trochoidális horonymarás egyfajta palástmarás, ahol a horonyszélességnek legalább 15%-kal nagyobbnak 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 szerszámátmérő kétszerese [15]. Eredményeikből látható, hogy trochoidális marás esetén a fellépő forgácsoló erők 25%-kal kisebbek, mint telibemarás esetén, illetve az anyagleválasztási teljesítmény azonos szerszámkopás esetén közel háromszorosára emelkedett. A hűtésnek szignifikáns hatása van a megmunkálási folyamatra [16].

A hűtés-kenési/hevítési eljárásoknak is jelentős hatása van forgácsolási folyamatra. Manapság sokan kutatják a kriogénhűtéssel segített forgácsolást, mely során főként folyékony széndioxidot vagy folyékony nitrogént juttatnak a forgácsolási zónába. Aramcharoen és Chuan (2014) kutatásukban hűtés nélkül, olaj-bázisú hűtő-kenő folyadékkal és folyékony nitrogénnel hűtötték a forgácsolási zónát. Azt állítják, hogy a kriogénhűtés hatására nagymértékben csökken a forgácsolási hőmérséklet, javulnak a súrlódási viszonyok a munkadarab és a szerszám között, ezáltal csökkennek a fellépő forgácsoló erők és a szerszámkopás, mely által a szerszáméltartam jelentősen megnövekszik. Az anyag elridegedése miatt javul a forgácstörés, mely forgácskihozattal eredményez és javul a megmunkált felület minősége [17].

Hevítési eljárások közül ma nagyon kutatott területnek számít a lézerrel segített forgácsolás. Zhang és munkatársai (2022) Inconel 718 típusú Nikkel-bázisú szuperötvözet horonymarásánál vizsgálták a lézerteljesítmény hatását a megmunkálási folyamatra. Kutatásukban arról számoltak be, hogy a fellépő forgácsoló erők és az átlagos felületi érdesség közel a felére csökkentek, a szerszámon meg csak bekopás látszódik, míg a hagyományos marás esetén erős kipattogzódás figyelhető meg az élen azonos megmunkálási úthossz mellett [18]. Oh és munkatársai (2014) Ti-6Al-4V horonymarásánál hasonlították össze a hagyományos és lézerrel segített marás kapott forgácsoló erőket, mely során azt kapták, hogy a lézerrel segített marás esetén 50 %-kal csökkentek a fellépő a hagyományos, olaj-bázisú hűtéshez képest [19].

3.3. Forgácsoló szerszámok

Szerszámanyagokat tekintve a leggyakrabban a keményfém, majd a kerámiát és a kőbőrnitridet (CBN) használják ezen anyagok horonymarása esetén. Egyrészt ez a keményfém szerszámok relatív olcsósága miatt lehetséges a kerámia- és CBN szerszámokhoz képest. Ez a nagy árkülönbség a két anyag között az előállításuk kapcsán figyelhető meg. Amíg a keményfém

gyémánszemcsés köszörűvel könnyen tudjuk készre gyártani, addig a kerámia és CBN szerszámok esetén ez nagyon nehéz, ezért nem is jellemző, hogy monolit szerszámokat készítenének ezen anyagból. A másik ok pedig, hogy ezen ötvözetek forgácsolásakor a szerszámra nagy hajlítógénybevétel hat, melyet a kerámiák nagyon nehezen viselnek. Maga a szerszámkiállítás a megmunkálási folyamatban csupán csak 3 %-át teszi ki a teljes költségnek. Az igazi jelentősége a szerszámfejlesztésnek abban van, hogy emelt technológiai paraméterekkel (forgácsoló sebesség, fogásmélység, fogankénti előtolás) tudjunk dolgozni megmunkálás során. A forgácsoló sebesség 20%-os növelése a teljes költség 15 %-os csökkentéséért felel.

Minél hosszabb szerszáméltartam elérése azért is fontos, mert sok esetben van, mikor 300-400 mm hosszú hornyokat is ki kell alakítani, mely során egyáltalán nem mindegy, hogy hányszor kell szerszámot cserélni. Ezek a cserék egyrészt holtidőt is jelentenek, melyek jelentős költségekkel járnak, továbbá kérdéses, hogy mennyire pontosan lehet visszaállni abba a pozícióba, mely pontban a megmunkálás meg lett szakítva. A 4. ábrán bemutatott szerszáméltartamot befolyásoló tényezők vizsgálata ezért is fontos, hogy növeljük az éltartamot és amennyiben lehetséges, ezt magasabb technológia adatok mellett.

4. Összegzés

Jelen publikációmban bemutattam a Nikkel-bázisú szuperötvözetek alkalmazási területeit, azok gazdasági és politikai trendjeit, melyek biztosítják a kutatás aktualitását. Ishikawa diagramon keresztül szemléltettem a szerszáméltartamot befolyásoló tényezőket és jelentőségüket, illetve röviden arról is szót ejtek, ki mire jutott az egyes területeken a világban. Rávilágítottam arra is, hogy az alapanyag rendkívül drága és az esetleges hibázás nem javítható, ezért fontos egy stabil, termelékeny technológia kidolgozása, mellyel biztonságosan és relatív gyorsan tudjuk ezen szuperötvözeteket forgácsolni.

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] Rolls-Royce: Trent 800, [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] PwC: Aerospace and defense (A&D) performance and outlook, [online] Available at: <https://www.pwc.com/us/en/industries/industrial-products/library/aerospace-defense-review-and-forecast.html> [Accessed: 15. 12. 2022].

- [10] INTERNATIONAL TRADE ADMINISTRATION: Leading Economic Indicators Aerospace Industry, [online] Available at: <https://www.trade.gov/leading-economic-indicators-aerospace-industry> [Accessed: 15. 12. 2022].
- [11] Ficzer, P., Borbás, L., Török, Á.: Economical investigation of rapid prototyping, International Journal for Traffic and Transport Engineering, 2013, vol. 3, no. 3., pp. 344-350., [http://dx.doi.org/10.7708/ijtte.2013.3\(3\).09](http://dx.doi.org/10.7708/ijtte.2013.3(3).09)
- [12] Design World: Photos of the Day: An Inside Look at a GE's Gas Turbine Plant, [online] Available at: <https://www.designworldonline.com/photos-of-the-day-an-inside-look-at-a-ge-gas-turbine-plant/> [Accessed: 07. 01. 2023].
- [13] 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>
- [14] Karmiris-Obratański, P., Karkalos, N. E., Kudelski, R., Markopoulos, A. P.: Experimental study on the effect of the cooling method on surface topography and workpiece integrity during trochoidal end milling of Incoloy 800, Tribology International, 2022, vol. 176, p. 107899, <https://doi.org/10.1016/J.TRIBOINT.2022.107899>
- [15] 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>
- [16] 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>
- [17] 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>
- [18] Zhang, H., Yan, R., Deng, B., Lin, J., Yang, M., Peng, F.: Investigation on surface integrity in laser-assisted machining of Inconel 718 based on in-situ observation, 2022, Procedia CIRP, vol. 108, no. C, pp. 129–134, <https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2022.03.025>
- [19] Oh, N. S., Woo, W. S., Lee, C. M.: A study on the machining characteristics and energy efficiency of Ti-6Al-4V in laser-assisted trochoidal milling, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology, 2018, vol. 5, no. 1, pp. 37–45, <https://doi.org/10.1007/S40684-018-0004-Y/METRICS>