

Ni-bázisú szuperötvözetek megmunkálhatósága váltólapkás marószerszámok alkalmazásával

Machinability of Ni-based Superalloys by Indexable End Mills

Kun Krisztián,¹ Kodácsy János,² Vaczkó Dániel,³ Kovács Zsolt Ferenc⁴

Neumann János Egyetem, GAMF Kar, Jár műtechnológia Tanszék, Kecskemét, Magyarország

¹ kun.krisztian@gamf.uni-neumann.hu

² kodacsy.janos@gamf.uni-neumann.hu

³ vaczko.daniel@gamf.uni-neumann.hu

⁴ kovacs.zsolt@gamf.uni-neumann.hu

Abstract

The subject of the research is the machining of Ni-based super alloys using indexable end mills. The cutting ability of these materials is known to be difficult, even challenging with modern tools, so our goal is to create an efficient technology recommendation on an experimental basis. To this end, we have developed an experimental design, which results are used to determine the optimal technological parameters. This research took place at John Von Neumann University, Department of Vehicle Technology of GAMF Faculty.

Keywords: *Ni-based superalloy, built-up edge, tool wear.*

Összefoglalás

A kutatás témája a Ni-bázisú szuperötvözetek váltólapkás maróval történő megmunkálása. Mivel ezen anyagok forgácsolhatósága közismerten nehéz, még a modern szerszámok mellett is kihívást jelent, ezért célunk egy hatékonyan alkalmazható technológiai ajánlás létrehozása kísérleti úton. Ennek érdekében kísérlettervet alakítottunk ki, amelynek eredményeit kiértékelve az optimális technológiai változók megállapíthatók. Ennek a megvalósítására a Neumann János Egyetem GAMF Karának Jár műtechnológiai Tanszékén került sor.

Kulcsszavak: *Ni-szuperötvözet, élrátét, szerszámkopás.*

1. Bevezetés

A járműiparban, kiváltképp a repüléstechnikához és az űrkutatáshoz kapcsolódó iparágakban egyre szélesebb körű a Ni-bázisú szuperötvözetek felhasználása. A mai, korszerű repülőgépeket szinte kizárólag korunk egyik legfejlettebb energiaátalakító berendezései, a gázturbinák hajtják, de használják őket erőművekben is. A turbina bemeneti részére érkező gáz hőmérséklete nagy teljesítményű sugárhajtóműveknél elérheti az 1650 °C-ot. A nagy hőmérséklet mellett a turbinalapátoknak még percenként akár 10 000-et meghaladó fordulatszámot is el kell vi-

selniük. Manapság a turbinákban a legnagyobb hőmérsékleteknek kitett terelőlemezeket és turbinalapátokat különlegesen nagy olvadáspontú nikkelötvözetekből, úgynevezett nikkelalapú szuperötvözetekből készítik [1]. Ezen ötvözetek jellemzője a nagy szilárdság, a rossz hővezető képesség, a paramágnesesség. További előnyük, hogy megőrzik szilárdságukat és ellenállnak a korróziónak extrém nagy hőmérsékleteken is. A belőlük készült alkatrészeket gyakran forgácsolják annak ellenére, hogy tulajdonságaik alapján a különösen nehezen forgácsolható anyagok közé sorolhatók. Forgácsolhatóságuk még a modern, váltólapkás szerszámok mellett is nagy kihí-

vást jelent. Jellemzően az intenzív szerszámkopás és a lapkatörés jelenti a legnagyobb problémát. Az ismertetésre kerülő kísérleti munka során a GTD-111 márkanévű szuperötvözet marási lehetőségeit vizsgáltuk [2–7].

1.1. A kísérletek során alkalmazott anyag és szerszámok

A megfelelő szerszámok kiválasztása minden esetben nagy odafigyelést és szakértelmet kíván. Egy rosszul kiválasztott szerszám instabil gyártáshoz, szerszámtöréshez vezethet, illetve növelheti a munkadarab gyártásának költségeit. Egy jó döntéssel növelhető a gyártás biztonsága, termelékenysége, valamint csökkenthetők a ciklusidők és a szerszámgép igénybevétele is [8]. Számos szerszámanyag ismert, ami alkalmas lehet Ni-szuperötvözet megmunkálására. Általánosan elfogadott tény, hogy szikraforgácsolással könnyen meg tudjuk munkálni [9], viszont ennek időigénye nagy, ezért végeznek kutatásokat alternatív lehetőségek [10] és szerszámanyagok – például kerámia – feltárására [11]. A szerszámanyagok mellett a forgácsoláskor alkalmazott megmunkálási stratégia is fontos tényezőként jelenhet meg [12, 13].

1.1.1. A kísérlet során felhasznált anyag

A kutatásban vizsgált GTD-111 Ni-bázisú szuperötvözet, amelyet különleges, vákuumos öntéssel állítottak elő. Az anyag kémiai összetétele az 1. táblázatban található [14].

Forgácsolhatóságát tekintve a szuperötvözetek közt is az egyik legnehezebben forgácsolható anyag. Rossz hővezetés jellemzi, ami forgácsolásnál nagyon kritikus, mivel ideális esetben a leválasztott anyag (forgács) viszi el a legtöbb hőt,

1. táblázat. A GTD-111 szuperötvözet kémiai összetétele [14]

Ötvözők (GTD-111)	Összetétel (%)
Ni	62,37
C	0,08
Cr	13,7
Co	9
Al	2,8
Ti	4,7
W	3,5
Mo	1,4
Ta	2,4
B	0,05

továbbá nagyon stabil és nagy teljesítményű szerszámgépre van szüksége, mivel nagy a fellépő forgácsolási erő. A GTD-111 jelű Ni-bázisú anyag forgácsolásának szempontjából fontos mechanikai és fizikai tulajdonságok a 2. táblázatban találhatóak.



2. táblázat. A GTD-111 mechanikai és fizikai tulajdonságai [14]

Szakítószilárdság, R_m (MPa)	1310
Nyúlás, A_5 (%)	5
Kontrakció, Z (%)	5
Keménység	HRC 41,4
Hővezető képesség 20 °C-on, λ (W/(m·K))	12,56

1.1.2. A szerszámválasztás szempontjai

A váltólapkás marók három fő részből állnak: a szerszámtestből, a lapkából és a lapka bevonatából. Először a váltólapka bevonatát választottuk ki a megmunkálni kívánt anyaghoz, a TaeguTec® cég által gyártott bevonatok közül. Ehhez rendelkezésre állt egy bevonatválasztó segédlet, amelyben rangsorolva van az összes, marásra kifejlesztett TaeguTec® bevonat. Ezek az 1. ábrán látható táblázatban vannak elrendezve a szívóosságuk és a keménységük alapján, alulról felfele haladva. Esetünkben a GTD-111 Ni-bázisú szuperötvözet, amely az S csoportba tartozik, amit barna szín jelöl a táblázatban.

A segédlet alapján a következő bevonatok jöhetnek szóba: TT9080, TT9030, TT8080 és TT8020. Mind a négy választható bevonatminőség PVD (Physical Vapor Deposition) bevonat, amelyek között a különbség a lapkára felvitt bevonati rétegek minősége és azok felvitelének sorrendje. A pontos bevonat kiválasztása a lapkageometria meghatározásánál fog megtörténni, mivel a gyártó nem gyárt le egy adott geometriát mindenfajta bevonattal. A következő lépésként kiválasztottuk a lehetséges szerszámokat és lapkákat. A kísérletben Ø20 mm-es sarokmaróra van szükség, amelyet Weldon-megfogással fogunk be, és ehhez olyan lapkát kell párosítani, amely 3 mm-es fogásmélységre képes. Ennek kiválasztására is nagy segítséget kapunk a gyártótól. A szerszám kiválasztásánál figyelembe vettük a gyakorlatban használt lapkageometriákat, amelyek alapján a 0 fok hátszögű lapkákra esett a választás, mivel ezeknek a lapkáknak jóval stabilabb és merevebb a forgácsolóéke. Ezen információk alapján a katalógusban a 4NKT 060308R-ML és 6NKU 040308R-M lapkákra esett a választás (2. ábra).

 <p style="text-align: center;">Marás</p>	TT2510	P05-P25	H05-H25	<p style="text-align: center;">Keménység</p>  <p style="text-align: center;">Szívósság</p>	
	TT7515	P05-P25	K05-K25		
	TT6080	K05-K25	H05-H25		
	TT7080	P05-P25	K05-K25		
	TT9080	P20-P40	M20-M40		S20-S40
	TT9030	P20-P40	M20-M40		S20-S40
	TT7800	P30-P45	M30-M45		
	TT8080	P30-P50	M30-M50		S30-S50
	TT8020	P30-P50	M30-M50		S30-S50

1. ábra. A TaeguTec bevonatválasztó segédlete [15]

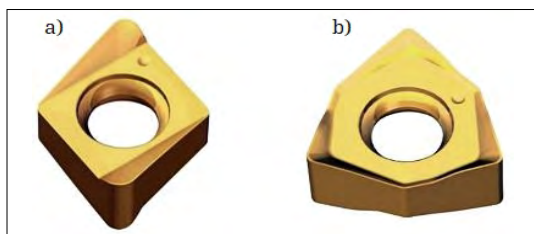
A lapkák választása után két olyan bevonattípust választottunk a lapkákhoz, melyek nagymértékben eltérnek egymástól tulajdonságaikban. Így a TT9080 és TT8080 minőségű bevonatokat választottuk.

Mivel a kísérletek során nagyoló megmunkálásra fogjuk tesztelni a szerszámokat, ezért a katalógus ajánlása alapján a TT8080 bevonatot választottuk. Ezt követően a lapkákhoz kiválasztottuk a Ø20 mm-es, Weldon-befogású marókat. Mivel mind a két lapkageometriához azonos fogszámú szerszámot terveztünk használni, ezért a 3 fogszámú marók mellett döntöttünk. Ezek jelölése 4N TE90-320-W20-06, amely a 4NKT 060308R-ML lapkához való marószár és 6N TE90-320-W20-04, ami a 6NKTU 040308R-M lapkához való maró (3. ábra).

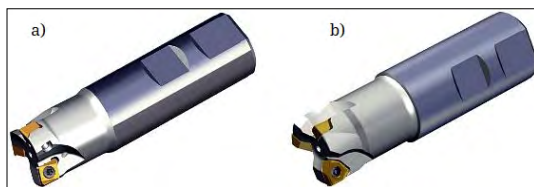
A kísérletek során a szerszámokat „A” és „B” szerszám néven különböztettük meg egymástól. Az „A” szerszám néven a 4NKT 060308R-ML típusú lapkát és a hozzá tartozó 4N TE90-320-W20-06 marószárat, míg a „B” szerszám néven 6NKTU 040308R-M típusú lapkát és a hozzá tartozó 6N TE90-320-W20-04 marószárat jelölte.

2. A kísérletterv elkészítése

A kísérletek elvégzéséhez Taguchi-módszert alkalmaztunk, melynek kísérletterve a Minitab17 szoftver segítségével készült. Ez a kísérlettervezési módszer segít megtalálni a kísérleti eredményre ható, legbefolyásolóbb faktorokat és azok lehetséges összes kombinációját, valamint mindezek hatását a kísérleti eredményre. Segíti megtalálni az optimális eredményt hozó faktorkom-



2. ábra. a) 4NKT 060308R-ML és b) 6NKTU 040308R-M lapkák [16]



3. ábra. a) 6N TE90-320-W20-04 és b) 6NKTU 040308R-M marószerszámok [16]

binációt. A marási faktorokhoz a szinteket, azon belül a forgácsolási sebesség (v_c) és a fogankénti előtolás (f_z) szintjeit a TaeguTec® katalógusa alapján adtuk meg.

3. táblázat. Marási faktorok és szintek a kísérletek tervezéséhez

Marási faktorok		Szintek			
		1	2	3	4
A	v_c (m/min)	10	20	30	40
B	f_z (mm/fog)	0,03	0,07	0,11	0,15
C	Szerszám	A geometria		B geometria	

2.1. A forgácsolási kísérletterv részletei

A munkadarabot gépsatu segítségével rögzítettük az EML850D típusú CNC megmunkálóközpont asztalához. A satuban a munkadarabot úgy rögzítettük, hogy a homlokfelülete a satuból 14 mm-t állt ki (4. ábra).

A kifogas méretét úgy határoztuk meg, hogy adott volt a 3 mm-es fogásmélység, amit nyolcszor fogunk megismételni az „A” és a „B” számmal egyaránt a munkadarab 130 mm-es hosszán. Mivel a 24 mm-es mélység már majdnem sok az egyik számnak a geometriájából adódóan, valamint a forgács távozása is nehezebb lett volna a 24 mm mély hornyokból, így elfeleztük ezt az értéket. Ezáltal egy számmal két-két hornyot munkáltunk ki, 12-12 mm-es mélységben, így optimális a munkadarab megfogása, és könnyebb a forgács távozása is. A részletes kísérletterv technológiai változóit a 4. táblázat foglalja össze.

4. táblázat. A GTD-111 anyag marásához használt Taguchi-kísérletterv

Ssz.	v_c (m/min)	f_z (mm/fog)	Szerszám	Jelölés*
1.	10	0,03	A	AB1
2.	10	0,07	B	BB1
3.	10	0,11	A	AB2
4.	10	0,15	B	BB2
5.	20	0,03	B	BB3
6.	20	0,07	A	AB3
7.	20	0,11	B	BB4
8.	20	0,15	A	AB4
9.	30	0,03	A	AJ1
10.	30	0,07	B	BJ1
11.	30	0,11	A	AJ2
12.	30	0,15	B	BJ2
13.	40	0,03	B	BJ3
14.	40	0,07	A	AJ3
15.	40	0,11	B	BJ4
16.	40	0,15	A	AJ4

*A hornyok jelölése:

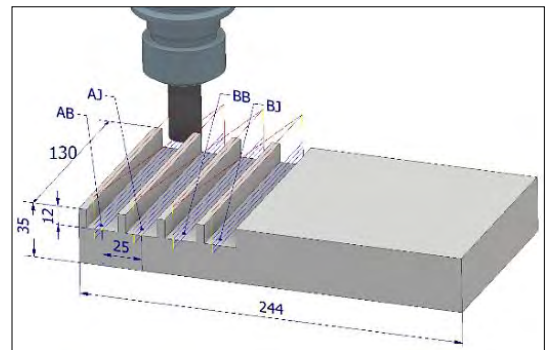
AB – „A” számszám és „B” bal oldali hornyok
 BB – „B” számszám és „B” bal oldali hornyok
 AJ – „A” számszám és „J” jobb oldali hornyok
 BJ – „B” számszám és „J” jobb oldali hornyok

3. Kiértékelés

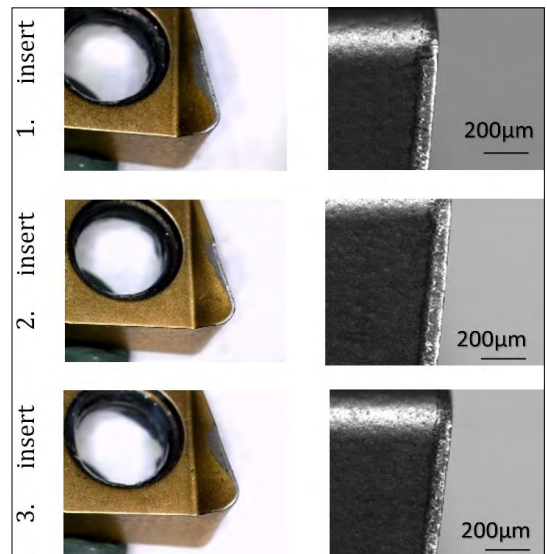
A lapkakapások kiértékeléséhez létrehoztunk egy szempontlistát, amelyet a tesztknél a tapasztaltak és az elvárt kritériumok alapján állítottunk össze. A szempontlista 1-től 9-ig értékelt, ezt a listát az 5. táblázat foglalja össze.

A legjobb kísérleti eredménynek az AB1 jelű bizonyult. A számszám lapkáról készült mikroszkópi képet az 5. ábra mutatja. A lapkák homlok- és hátkopása egyaránt egyenes. A lapka homlokfelületén jól látható, hogy a bevonat lekopott, de egyéb sérülés nincs a lapkán.

Az áttekinthetőség érdekében készült a 6. táblázat, amely összefoglalja a kísérlettervben szereplő technológiai változóknak az 5. táblázat szempontrendszere szerinti értékelését.



4. ábra. A kísérlet ábrázolása CAD szoftver segítségével



5. ábra. Az AB1 jelű kísérletnél használt „A” jelű számszám lapkái forgácsolás után és az élek mikroszkópi felvételei

5. táblázat. Használt váltólapkák osztályozási szempontjai

Érték	Szempont
1	Nem tudott végigmenni a megmunkálási hosszszon.
2	Végigment a megmunkálási hosszszon, de kritikusan kitöredezett és eltörött a lapka.
3	Végigment a megmunkálási hosszszon, de kritikusan kitöredezett a lapka forgácsolóéle, és lepattant a hátoldala.
4	Végigment a megmunkálási hosszszon, de kitöredezett és eltörött a lapka.
5	Végigment a megmunkálási hosszszon, de kitöredezett a lapka forgácsolóéle, és lepattant a hátoldala.
6	Végigment a megmunkálási hosszszon, de kitöredezett a lapka forgácsolóéle.
7	Végigment a megmunkálási szakaszon, de lepattant a lapka hátoldala.
8	Végigment a megmunkálási hosszszon, és jelentős a kopás.
9	Végigment a megmunkálási hosszszon, és egyenletesen kopott.

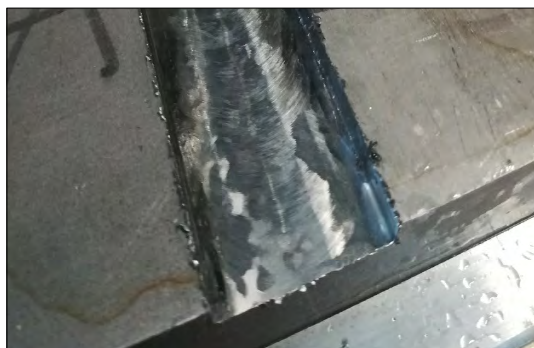
4. Összegzés

A forgácsolás során a legnagyobb hatással a szerszám élettartamára a forgácsolási sebesség (v_c) volt, majd ezt követte a fogankénti előtolás (f_z). Megfigyelhető, hogy a szerszámgeometria hatása elhanyagolható mértékben befolyásolta az élettartamot.

A leghatékonyabban alkalmazható technológiai változók a kísérletekből kapott értékekkel:

- forgácsolási sebesség $v_c = 10$ m/min,
- fogankénti előtolás $f_z = 0,03$ mm/fog,
- a szerszámgeometria pedig az „A” jelű szerszám.

Ezen értékekkel készült horony látható a **6. ábrán**.



6. ábra. Az AB1-es horony felülete és a képződött sorja

6. táblázat. A kísérlettervben szereplő technológiai változók kiértékelése a szempontrendszer szerint

#	v_c (m/min)	f_z (mm/fog)	Szerszám	Érték
AB1	10	0,03	A	9
AB2	10	0,11	A	5
AB3	20	0,07	A	6
AB4	20	0,15	A	2
BB1	10	0,07	B	7
BB2	10	0,15	B	4
BB3	20	0,03	B	8
BB4	20	0,11	B	5
AJ1	30	0,03	A	8
AJ2	30	0,11	A	1
AJ3	40	0,07	A	1
AJ4	40	0,15	A	1
BJ1	30	0,07	B	3
BJ2	30	0,15	B	1
BJ3	40	0,03	B	1
BJ4	40	0,11	B	1

Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozunk a kutatás támogatásáért, amely az EFOP-3.6.1-16-2016-00006 *A kutatási potenciál fejlesztése és bővítése a Neumann János Egyetemen* pályázat keretében valósult meg. A projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával, az Széchenyi 2020 program keretében valósul meg.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Sajjadi S. A., Nategh S., Isac M., Zebarjad S. M.: *Tensile deformation mechanisms at different temperatures in the Ni-base superalloy GTD-111*. Journal of Materials Processing Technology 155–156. (2004) 1900–1904. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.273>
- [2] Bhadeshia H. K. D. H.: *Recrystallisation of practical mechanically alloyed iron-base and nickel-base superalloys*. Materials Science and Engineering A 223. (1997) 64–77. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(96\)10507-4](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(96)10507-4)
- [3] Kodácsy J., Viharos Zs. J., Kovács Zs.: *A forgácsolhatóság meghatározásának módszerei Ni-bázisú szuperötvözetek horonymaráskor*. Gépgyártás 55(2). (2015) 125–129.
- [4] Zhu D., Zhang X., Ding H.: *Tool wear characteristics in machining of nickel-based superalloys*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 64. (2013) 60–77. <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2012.08.001>

- [5] Lendvai János: *Szuperötívózet egykristályok–drágakövek a gázturbinákban*. Fizikai Szemle 2006/10.
- [6] Qi Y., Zhang Y., Zhang W., Gao J., Yuan Z., Bu W., Li Y., Guo S.: *Hydrogen storage thermodynamics and kinetics of RE-Mg-Ni-based alloys prepared by mechanical milling*. International Journal of Hydrogen Energy 42/29. (2017) 18473–18483. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.134>
- [7] Ulutan D., Arisoy Y. M., Özel T., Mears L.: *Empirical modeling of residual stress profile in machining nickel based superalloys using the sinusoidal decay function*. Procedia CIRP 13. (2014) 365–370. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2014.04.062>
- [8] Mali H. S., Unune D. R.: *Machinability of Nickel-Based Superalloys: An Overview*. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, (2017). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.09817-9>
- [9] Kang X., Tang W.: *Micro-drilling in ceramic-coated Ni-superalloy by electrochemical discharge machining*. Journal of Materials Processing Technology, 255. (2018) 656–664. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.01.014>
- [10] Obikawa T., Yamaguchi M., Funai K., Kamata Y., Yamada S.: *Air jet assisted machining of nickel-base superalloy*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 61. (2012) 20–26. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.05.005>
- [11] Sajgalik M., Czan A., Drbul M., Danis I., Miklos M., Babik O., Joch R.: *Identification of Technological Parameters when Machining Ni-Alloys by Monolithic Ceramic Milling Tool*. Procedia Manufacturing 14. (2017) 51–57. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.11.006>
- [12] Pleta A., Mears L.: *Cutting Force Investigation of Trochoidal Milling in Nickel-Based Superalloy*. Procedia Manufacturing 5. (2016) 1348–1356. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.08.105>
- [13] Luo M., Lou H., Zhang D., Tang K.: *Improving tool life in multi-axis milling of Ni-based superalloy with ball-end cutter based on the active cutting edge shift strategy*. Journal of Materials Processing Technology 252. (2018) 105–115. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.09.010>
- [14] Raznjevic K.: *Hőtechnikai táblázatok*. Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1964.
- [15] TaeguTech: *Grade Chart*. (letöltve: 2019. május 12.) http://www.taegutec.co.kr/Media/DownloadFiles/grade_en.pdf
- [16] TaeguTec: *Elektronikus katalógus*. (letöltve: 2019. május 12.) <http://www.imc-companies.com/TaeguTec/ttk-Catalog/Index.aspx>