

A NI-BÁZISÚ SZUPERÖTVÖZETEK MEGMUNKÁLHATÓSÁGA HORONYMARÁSKOR

MACHINABILITY OF THE NI-BASED SUPERALLOYS BY END MILLING

Kodácsy János^{1*}, Kovács Zsolt Ferenc², Viharos Zsolt János³

^{1,2}Járműtechnológia Tanszék, Gépipari és Automatizálási Műszaki Főiskolai Kar, Kecskeméti Főiskola,
Magyarország

³MTA SZTAKI, Budapest, Magyarország

Kulcsszavak:

Ni-bázisú szuperötvözet
horonymarás
forgácsolóerő
forgácsolási nyomaték
forgácsolási hőmérséklet

Keywords:

Ni-based superalloy
end milling
cutting force
cutting torque
cutting temperature

Cikktörténet:

Beérkezett 2015. október 10.
Átdolgozva 2015. október 31.
Elfogadva 2015. november 5.

Összefoglalás

A publikáció a Rene108 és a GTD111 jelű, Ni-bázisú szuperötvözetek horonymarása terén végzett kísérleti munka eredményeit foglalja össze. A megmunkálhatósági vizsgálatok során a szerzők erő és nyomaték, valamint ezt kiegészítve, hőmérséklet mérésére alkalmas eszközöket és módszereket alkalmaztak. A kísérleti eredmények hatékony gyakorlati alkalmazását elősegítendő, a mérési és az adatkiértékelési folyamatok során korszerű IT-eszközöket alkalmaztak.

Abstract

This paper describes the results of an R+D work in the field end milling of Rene108 and the GTD111 Ni-based superalloy. In the investigation of machinability by end milling technology, the authors used force, torque and additionally, temperature measuring equipments and methods. For the furtherance of the practical adaptation of the R+D results by the measuring process and data evaluation, advanced IT-tools were applied.

1. Bevezetés

Az energetikai, a repüléstechnikai valamint az űrkutatáshoz kapcsolódó iparágban egyre szélesebb körű a Ni-bázisú szuperötvözetek felhasználása. Valamennyi ötvözet közös jellemzője a nagy szilárdság, a rossz hővezető képesség, a hő- és korrózióállóság és a paramágnesesség. A belőlük készült alkatrészeket gyakran forgácsolják annak ellenére, hogy tulajdonságaiknak alapján a különösen nehezen forgácsolható anyagok közé sorolhatók. Az üzemi tapasztalatok szerint a hornyok marása okozza az egyik legtöbb problémát. A horonymarók igen intenzíven kopnak, sűrűn törnek, teljesítőképességük kirívóan alacsony. Az ismertetésre kerülő kísérleti munka során a Rene108 és a GTD111 ötvözeteket horonymarási lehetőségeit vizsgáltuk. Az első részben irodalmi adatokat is figyelembe véve ([1], [2]) elméleti összehasonlító forgácsolhatósági értékelést végeztünk, majd horonymarási kísérletekkel igyekeztünk feltárni az anyagválasztás nehézségeinek valódi körülményeit. A mérési adatok feldolgozása után mód nyílt az elméleti és gyakorlati szempontok alapján kialakított forgácsolhatósági mutatók összehasonlítására is.

* Kapcsolattartó szerző. E-mail cím: kodacsy.janos@gamf.kefo.hu

2. A Rene 108 és a GTD 111 jelű szuperötvözetek kémiai összetétele és tulajdonságai

A vizsgált és a kísérletekhez használt ötvözet a speciális vákuumöntéssel előállított *Rene108* (B50A936) és a *GTD111* (B50A719) Ni-bázisú szuperötvözet, melyek kémiai összetétele az 1. táblázatban látható. A táblázat referencia anyagként tartalmazza még a KO36Ti (X6CrNiTi1811) ausztenites korrózióálló és a C45 jelű ötvözetlen szénacél ide vonatkozó adatait is [3], [4], [5].

A 2. táblázat a forgácsolhatóság szempontjából lényeges mechanikai tulajdonságokat, a 3. táblázat a fizikai tulajdonságokat foglalja össze [6].

1. táblázat. A Rene108 és a GTD111 Ni-ötvözet, valamint a KO36Ti és C45 jelű acél kémiai összetétele

Anyag	Fe %	Ni %	C %	Si %	Mn %	Cr %	Co %	Al %	Ti %	W %	Mo %	Ta %	Zr %	B %	Hf %
Rene 108		63,3	0,07			8,00	9,00	5,25	0,60	9,30	0,40	2,80	0,005	0,01	1,3
GTD 111		62,37	0,08			13,7	9,00	2,80	4,70	3,50	1,40	2,4		0,05	
KO36 Ti	68,8	11	0,1	1	0,50	18			0,6						
C45	98,9		0,45	0,17	0,50										

2. táblázat. A Rene108 és a GTD111 Ni-ötvözet, valamint a KO36Ti és C45 jelű acél mechanikai tulajdonságai

Anyag	Szakítószilárdság, MPa	Nyúlás A ₅ , %	Kontrakció Z, %	Keménység HB, N/mm ²	Keménység HRC
Rene108	1331	8	10		42,1
GTD111	1310	5	5		41,4
KO36Ti	490	40	55	180	
C45	610	16	40	230	

3. táblázat. A Rene108 és a GTD111 Ni-ötvözet, valamint a KO36Ti és C45 jelű acél fizikai tulajdonságai

Anyag	Fajlagos tömeg ρ , kg/m ³	Hővezetőképesség 20°C-on λ , W/m·K	Fajhő 20 °C-on c , J/kg·K
Rene108	8130	12,10	0,444 x 10 ³
GTD111	8000	12,56	0,452 x 10 ³
KO36Ti	7800	12,50	0,502 x 10 ³
C45	7700	45,35	0,461 x 10 ³

3. Forgácsolhatóság a mechanikai és fizikai jellemzők alapján

Valamely fém forgácsolhatóságát főleg a következő jellemzők befolyásolják: a szövetszerkezet, a szakítószilárdság és keménység, a nyúlás és kontrakció, a hővezető képesség és a fajhő (hőtárolóképesség) [7].

A Ni-bázisú szuperötvözetek szövetszerkezetét az ausztenites γ -fázis, γ' -fázis, primer fémkarbid és szekunder fémkarbid fázisok alkotják. Az ausztenites fázisra a korrózió- és hőállóság, a rossz hővezető-képesség és a paramágnesesség jellemző. A Ni-bázisú szuperötvözetek nagy szilárdsága a γ' -fázisnak és a fémkarbidoknak köszönhető. A γ -fázis lapközepes, köbös kristályszerkezetű, ahol a Ni, Ti, Al atomok véletlenszerűen oszlanak el a rácspontokban. A kiválás útján létrejött γ' -fázis kristályai szintén lapközepesek, köbösek, de itt az atomok elhelyezkedése meghatározott: lapközepén a Ni atomok, míg a csúcspontokban a Ti vagy Al atomok helyezkednek el. A két fázis között a diszlokációk nehezen tudnak átlépni, és ez növeli az ötvözet szilárdságát. A Rene108 és a GTD111 ötvözetek vegyi összetétele olyan, hogy öntéskor és az azt követő hőkezeléskor megvan a lehetőség az igen kemény primer (TiC, TaC, NdC) és szekunder karbid

(WC, Cr₂₃C₆, Mo₂C) képződésre, melyek a szemcsehatárok mentén kiválva akadályozzák az elcsúszást, tovább növelve az ötvözet szilárdságát [8]. A forgácsolhatóságot erősen rontja a karbidok intenzív koptató hatása is.

A szakítószilárdságot, a keménységet és a képlékeny alakíthatóságot tekintve – ha elfogadjuk, hogy szilárdabb, keményebb és a felkeményedésre hajlamosabb anyag nehezebben forgácsolható – a referencia anyagokhoz viszonyított forgácsolhatósági sorrend a következő: KO36Ti ($\sigma_{EKO36} = 664 \text{ N/mm}^2$) ← C45 ($\sigma_{EC45} = 670 \text{ N/mm}^2$) ← GTD111 ($\sigma_{EGTD11} = 1345 \text{ N/mm}^2$) ← Rene 108 ($\sigma_{ERENE108} = 1391 \text{ N/mm}^2$). A rangsorolás az σ_E egyenletes nyúlás valódi határfeszültsége alapján történt, ami a szakítószilárdságon kívül (R_m) figyelembe veszi az anyag nyúlását (A_5) is:

$$\sigma_E = \frac{R_m}{1 - \frac{0,52 \cdot A_5}{1 - 0,52 \cdot A_5}} [\text{N/mm}^2] \quad (1)$$

Csak hőtani jellemzőkkel két forgácsolhatósági mutatószám is képezhető:

- hővezetési mutató $K_{hv} = \lambda/\rho$, (2)
- hőelnyelési mutató $K_{he} = \lambda \cdot c$. (3)

Mindkét mutató növekedése csökkenti a szerszám hőterhelését. Értékeiket a 4. táblázat tartalmazza.

4. táblázat. A Ni-bázisú szuperötvözetek, valamint a referencia anyagok hőtani mutatószámai

Anyag	K_{hv} , W·m ² /kg·K	Viszonyszám, %	K_{he} , J ² /m·kg·s·K ²	Viszonyszám, %
Rene108	0,00149	26	5,37 x 10 ³	26
GTD111	0,00157	27	5,68 x 10 ³	27
KO36Ti	0,00160	28	6,27 x 10 ³	30
C45	0,0058	100	20,91 x 10 ³	100

A táblázat szerinti a forgácsolhatósági sorrend: C45 ← KO36Ti ← GTD111 ← Rene108, ami – amint a későbbiekben kitűnik – az előző sorrendnél jobban, de még mindig nem tökéletesen tükrözi a valóságot. A megoldást a hibrid, hővezetési – szilárdsági

$$k_{hv} = K_{hv}/\sigma_E \quad (4)$$

és a hőelnyelési – szilárdsági

$$k_{he} = K_{he}/\sigma_E, \quad (5)$$

mutatók bevezetése jelentheti. Az így képzett hibrid mutatószámok értékei és azok százalékos arányai az 5. táblázatban láthatók, melyeket az utolsó oszlop átlagol (Átlag H).

5. táblázat. A Ni-bázisú szuperötvözetek, valamint a referencia anyagok hibrid mutatószámai

Anyag	k_{hv}	k_{he}	K_{hvc45}	K_{hec45}	Átlag H, % $K_{hvc45} + K_{hec45}$
			k_{hv}/k_{hvc45} , %	k_{he}/k_{hec45} , %	
Rene108	1,07 x 10 ⁻⁶	3,86	12,5	12,3	12,4
GTD 111	1,167 x 10 ⁻⁶	4,22	13,5	13,5	13,5
KO36Ti	2,41 x 10 ⁻⁶	9,44	27,8	30,2	29
C45	8,66 x 10 ⁻⁶	31,21	100	100	100

A táblázatból az olvasható ki, hogy a vizsgált Ni-bázisú szuperötvözetek megmunkálásakor a C45 ötvözetlen szerkezeti acélhoz viszonyítva 87...88%-os, míg a KO36Ti ausztenites, Ni-tartalmú acélötvözethez képest 52...56 %-os forgácsolhatóság csökkenésre számíthatunk.

4. Forgácsolhatóság aforgácsolási kísérletek alapján

Az irodalmi adatok, normatívák és ajánlások alapján képzett forgácsolhatósági mutatószámok és azok összehasonlító elemzése a konkrét problémák megoldására csak támpontként szolgál. A valódi helyzetfelmérés forgácsolási kísérletekkel lehetséges. Igaz ez ebben az esetben is, amikor a Ni-bázisú Rene108 és a GTD111 szuperötvözetek zárhorony marása a konkrét feladat.

4.1. A kísérleti körülmények

A kísérleteket CNC megmunkáló központon végeztük. A munkadarabokat kézi működtetésű gépsatuba rögzítettük, a szerszámokat precíziós patronba fogtuk. Szerszámként a Walter cég Protomax™H4038217-8-1 jelű, változó horonyemelkedésű újmaróját használtuk, melynek jellemzői: $z = 4$ fog, $D = \varnothing 8$ mm, nagy Co-tartalmú ($Co \approx 12\%$), finomszemcsés keményfém alapanyag, TiAlN-ZrN összetételű kopásálló és súrlódáscsökkentő bevonat.

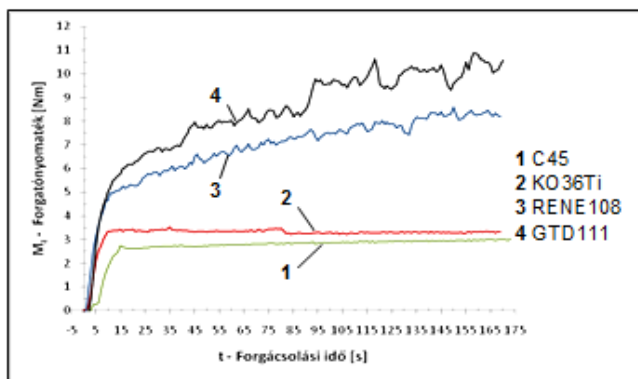
A forgácsolóerő és –nyomaték méréseket a KISTLER 9125A24A2 típusú nyomaték- és erőmérővel végeztük. Az adatok a DynoWare 2825A1-2 számítógépes szoftver segítségével értékelhetők ki. A horonyból távozó forgács hőméréséhez a FLIR T360 típusú infrakamerát használtuk. A mérésekről IR-fotók készültek, és a maximális hőmérséklet-értékeket rögzítettük.

Zárt hornyot martunk a következő technológiai paraméterekkel: $v_c = 16$ m/min; $f_z = 0,013$ mm/fog; $a_p = 7,5$ mm, $a_e = 8$ mm. A megmunkálási úthossz: $L = 90$ mm. A kísérleteket szerszámon kívüli árasztásos hűtéssel végeztük. Az alkalmazott hűtő-kenő folyadék: BLASOCUT 35 kombi, 6%-os olajkoncentrációval. Az adagolt mennyiség 15 l/min.

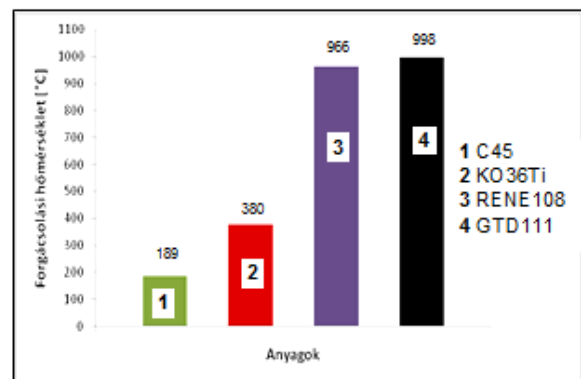
4.2. A kísérleti eredmények

Elsőként a forgácsolási nyomaték alakulását vizsgáltuk a négy, előbb felsorolt anyagra. A kapott eredményeket a 1. ábra szemlélteti. Látható, hogy a Ni-bázisú szuperötvözetek horonymarásakor a referenciaanyagokhoz viszonyított nyomaték magasan kezd, intenzíven emelkedik, és a mért értékek erősen szórnak, ami az fokozott szerszámkopás és az intenzív rezgés következménye. GTD111 ötvözet produkálja a legmagasabb értékeket, és ha ez elérjük az $M_c = 10$ Nm-t, tapasztalat szerint a szerszám 90 %-os valószínűséggel eltörik. Meg kell jegyezni, hogy az itt alkalmazott szerszámmal, technológiával és úthosszal a KO36Ti és a C45 referenciaanyagok közt elhanyagolható a különbség, kisebb a szerszámkopás és rezgésmentesebb az anyagleválasztás is. Az úthossz nagyságát a Ni-ötvözetek forgácsolása során tapasztalt gyors szerszám-tönkremenetel korlátozta.

Infrakamerával mértük a horonyból hűtés-kenés nélkül távozó forgács hőmérsékletét az $L = 90$ mm munkaút megtétele után, kopott szerszámokkal. A képernyőn megjelenő maximális értékekből oszlopdiagram készült (2. ábra). A 6. táblázata kísérletek során mért nyomatékokat és hőmérsékleteket tartalmazza abszolút és százalékos formában. Az átlagos százalékos értékek (Átlag K) összevethetők az 5. táblázat C45-re vonatkozó, hibrid mutatószámaival (Átlag H).



1. ábra. A forgácsolási nyomaték

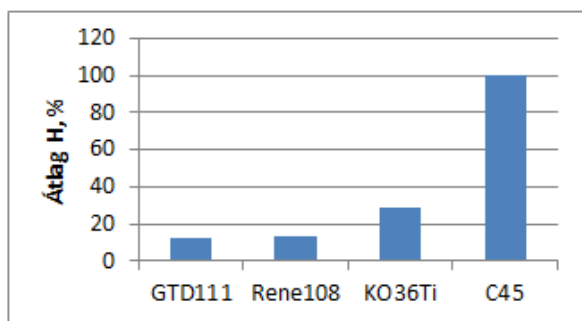


2. ábra. A forgács hőmérséklet

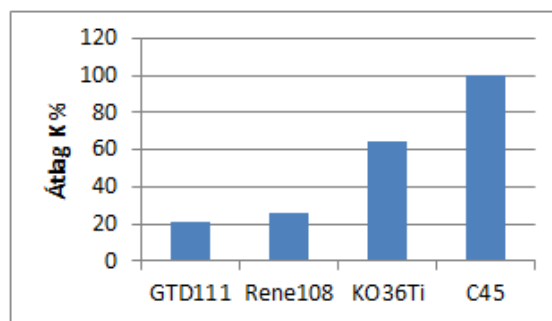
6. táblázat. A C45-re vonatkoztatott forgácsolhatósági viszonyszámok a kísérletek alapján

Anyag	Nyomaték, Nm	Viszonyszám, %	Hőmérséklet, °C	Viszonyszám, %	Átlag K, %	Átlag H, %
GTD 111	10,8	24	998	19	21	12,4
Rene 108	8	32	966	20	26	13,5
KO36Ti	3,2	81	380	52	65	29
C45	2,6	100	198	100	100	100

A 3. és 4. ábra szemlélteti a forgácsolhatóság alakulását az elméleti(hibrid) és a kísérleti adatok szerint.



3. ábra. Forgácsolhatóság a hibrid adatok szerint



4. ábra. Forgácsolhatóság a kísérleti adatok szerint

5. Értékelés és következtetés

A Ni-bázisú, Rene108 és GTD111 jelű szuperötvözetek hibrid forgácsolhatósági mutatószámai azt jelzik, hogy várhatóan ezen anyagok forgácsolhatósága a referenciaként használt C45 ötvözetlen szerkezeti acélhoz $\approx 15\%$, a KO36Ti jelű ausztenites acélhoz viszonyítva $\approx 50\%$ lesz. A referencia anyagok egymáshoz viszonyított forgácsolhatósága 30%-ra becsülhető, a C45 javára.

Elvégezve a mechanikai és hőtani jellemzőkkel összefüggő nyomaték- és hőmérési vizsgálatokat az előzetesen jelzett hibrid viszonyszámokhoz képest akár 45...50%-al is jobb eredményt kaptunk, ami a technológiai tervezéskor természetesen a biztonság irányába hat. Valószínűsíthető azonban, hogy az eltérés mértéke sokkal kisebb lenne, ha az éltartam vizsgálatok eredményét, a szerszámok teljes tönkremenetelig eltöltött időt is bevennénk az összemérésbe. Ez lehet a következő kutatás-fejlesztési feladat.

Gyakran előfordul, hogy valamely anyagot „jól forgácsolható” vagy „rosszul forgácsolható” jelzővel illetünk anélkül, hogy konkrét ismereteink lennének a technológia körülményekről. Az így kialakított vélemény csak hozzávetőleges lehet, de az anyag mechanikai és hőtani jellemzőivel képzett ún. hibrid mutatószámok támpontként szolgálhatnak a technológiai és a későbbi kutató munka megtervezéséhez is.

Irodalomjegyzék

- [1] www2.coromant.sandvik.com/.../C_2920_18_ENG_009
- [2] W.T. King: Nickel-base Alloy – RENE'108 – Investment Castings. GE Power kiadvány, 1996.
- [3] M.M. Bali: Nickel-base Alloy – GTD-111 – Investment Castings. GE Power kiadvány, 1978.
- [4] Kodácsy J.: A nehezen forgácsolható ausztenites korrózióálló acélok megmunkálhatóságának vizsgálata. Egyetemi doktori értekezés, NME, 1981.
- [5] K. Raznjevic: Hőtechnikaitáblázatok. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1964.
- [6] Dr. Pálmai Zoltán: Fémek forgácsolhatósága. Műszaki Könyvkiadó, Bp., 1980.
- [7] E. Lvov, D. Norsworthy: Influence of Previous Operational Cycle on the Microstructure of Rejuvenated Ni-Base Superalloy Gas Turbine Blades after their Return to Service. <http://turbolab.tamu.edu>