

# A forgácsolhatóság meghatározásának módszerei Ni-bázisú szuperötvözetek horonymarásakor



*Kodácsy János\*, Viharos Zsolt János, Kovács Zsolt*

\*Kecskeméti Főiskola, kodacsy.janos@gamf.kefo.hu

## Absztrakt

A publikáció a Rene108 és a GTD111 jelű, Ni-bázisú szuperötvözetek horonymarása terén végzett elméleti és kísérleti munka eredményeit foglalja össze. Amellett, hogy a szerzők forgácsolhatóság megítélésére új elméleti mutatószámokat vezettek be, a forgácsolási vizsgálatok során erő, nyomaték valamint hőmérséklet mérésére alkalmas eszközöket és módszereket is alkalmaztak. A kapott eredményeket táblázatokban és diagramokban foglalták össze úgy, hogy azokban feltüntették a C45 és KO36Ti jelű referencia anyagokra kapott eredményeket is, megkönnyítve ezzel százalékos viszonyszámokon alapuló mutatószámok értelmezését.

**Kulcsszavak:** forgácsolhatóság; Ni-bázisú szuperötvözet; horonymarás; forgácsolási nyomaték; forgácsolási hőmérséklet

## 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 paramágnesség. Az üzemi tapasztalatok szerint forgácsoláskor a hornyok marása okozza az egyik legnagyobb problémát. A

horonymarók igen intenzíven kopnak, sűrűn törnek, teljesítőképességük kirívóan alacsony. Az ismertetésre kerülő elemző és kísérleti munka során a Rene108 és a GTD111 ötvözetek horonymarási lehetőségeit vizsgáltuk. Az első részben irodalomból ismert módszereket [1] is figyelembe véve elméleti, összehasonlító forgácsolhatósági értékelést végeztünk, felhasználtuk a technológiai ajánlásokat, majd horonymarási kísérletekkel igyekeztünk feltárni az anyagleválasztás nehézségeinek valódi okát.

## 2. A vizsgált anyagok kémiai összetétele és tulajdonságai

A vizsgált anyag 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 [2], [3]. A C45 jelű acél a forgácsolhatósági vizsgálatok általánosan elfogadott referencia anyaga, míg a KO36Ti az erős Ni-ötvözet, az ausztenites szövetszerkezet és a rossz hővezető-képesség miatt jött számításba.

A 2. Táblázat a forgácsolhatóság szempontjából lényeges mechanikai tulajdonságokat, a 3. Táblázat, a fizikai tulajdonságokat foglalja össze [4].

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

	Fe %	Ni %	C %	Si %	Mn %	Cr %	Co %	Al %	Ti %	W %	Mo %	Ta %	Zr %	B %	Hf %
<b>Rene108</b>		63,3	0,07			8,00	9,00	5,25	0,60	9,30	0,40	2,80	0,005	0,01	1,3
<b>GTD 111</b>		62,37	0,08			13,7	9,00	2,80	4,70	3,50	1,40	2,4		0,05	
<b>KO36Ti</b>	68,8	11	0,1	1	0,50	18			0,6						
<b>C45</b>	98,9		0,45	0,17	0,50										

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

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

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

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

### 3. Forgácsolhatóság megítélése a mechanikai és fizikai jellemzők alapján

Valamely fém forgácsolhatóságát főleg a szövetszerkezet, a szakítószilárdság és keménység, a nyúlás és kontrakció, a hővezető képesség és a fajhő (hőtároló képesség) befolyásolják.

$$\sigma_E = \frac{R_m}{1 - \frac{0,52A_2}{1 - 0,52A_5}} \text{ N/mm}^2, \quad (1)$$

A Ni-bázisú szuperötvözetek szövetszerkezetét az ausztenites γ-fázis, a γ'-fázis, a primer fémkarbid és a szekunder fémkarbid összetevők 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 és γ'-fázis 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, Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>, Mo<sub>2</sub>C) képződésre, melyek a szemcsehatárok mentén kiválva akadályozzák az elcsúszást, tovább növelve ezzel az ötvözet szilárdságát. 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 rangsor az  $\sigma_E$  egyenletes nyúlás valódi határfeszültsége alapján történt, ami a szakítószilárdságon ( $R_m$ ) kívül figyelembe veszi az anyag nyúlását ( $A_5$ ) is:

Csak hőtani jellemzőkkel két forgácsolhatósági mutatószám is képezhető:

- hővezetési mutató  $K_{hv} = \lambda/\rho$ , (2)

- hőelnyelési mutató  $K_{he} = \lambda \cdot c$  (3)

Minkét mutató növekedése csökkenti a szerszám hőterhelését. Értékeiket és egymáshoz való viszonyukat az 4. Táblázat tartalmazza.

4. táblázat. A Ni-bázisú szuperötvözetek és a referencia anyagok hőtani mutatószámjai

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

A táblázat szerinti a forgácsolhatósági sorrend: C45 ← KO36Ti ← GTD111 ← Rene108, ami – amint a későbbiekben kitűnik – az előző sorrendnél jobban tükrözi a valóságot, de még korrekcióra szorul.

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 mutatószáma (H) átlagol.

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

Anyag	$k_{hv}$	$k_{he}$	$K_{hvC45}$	$K_{heC45}$	H, % $\frac{K_{hvC45} + K_{heC45}}{2}$
			$k_{hv}/k_{hvC45}, \%$	$k_{he}/k_{heC45}, \%$	
Rene108	$1,07 \times 10^{-6}$	3,86	12,5	12,3	12,4
GTD 111	$1,167 \times 10^{-6}$	4,22	13,5	13,5	13,5
KO36Ti	$2,41 \times 10^{-6}$	9,44	27,8	30,2	29
C45	$8,66 \times 10^{-6}$	31,21	100	100	100

#### 4. Forgácsolhatóság a technológiai ajánlások alapján

A forgácsolhatóság meghatározásakor célszerű figyelembe venni annak a szerszámgyártó cégeknek a technológiai ajánlásait, melynek szerszámait a kísérletek vagy a gyártás során alkalmazni kívánjuk. Ez esetünkben Európa egyik vezető szerszámgyártó cége, melynek katalógusában [5] a bevonatos keményfém horonymarókra az 6. Táblázat szerinti forgácsolósebességek találhatóak. A táblázat utolsó oszlopában a C45-re vonatkozó százalékos viszonyszámok, mint forgácsolhatósági mutatószámok is megtalálhatók.

6. táblázat. Forgácsolhatósági mutatószámok a technológiai ajánlások alapján

Anyag	Forgácsolósebesség, $v_c$ , m/min	Viszonyszám, A, %
GTD 111	20	12,5
Rene 108	20	12,5
KO36Ti	60	37,5
C45	160	100

#### 5. Forgácsolhatóság a forgácsolási kísérletek alapján

Az irodalmi adatok, normatívák és technológiai ajánlások alapján képzett forgácsolhatósági mutatószámok és azok összehasonlító elemzése a konkrét problémák megoldására csupán támpontként szolgálhat. A valódi helyzetfelmérés forgácsolási vizsgálatokkal lehetséges.

##### 5.1. A kísérleti körülmények

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

A forgácsolóerő és -nyomaték méréseket KISTLER 9125A24A2 típusú nyomaték- és erőmérővel végeztük. Az adatok a DynoWare 2825A1-2 számítógépes szoftver segítségével értékeltük 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 az összehasonlíthatóság miatt valamennyi vizsgált anyagon 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 szerszámon kívüli árasztásos hűtéshez alkalmazott hűtő-kenő folyadék: BLASOCUT 35 kombi, 6%-os olajkoncentrációval. Az adagolt mennyiség 10 l/min.

##### 5.2. A kísérleti eredmények

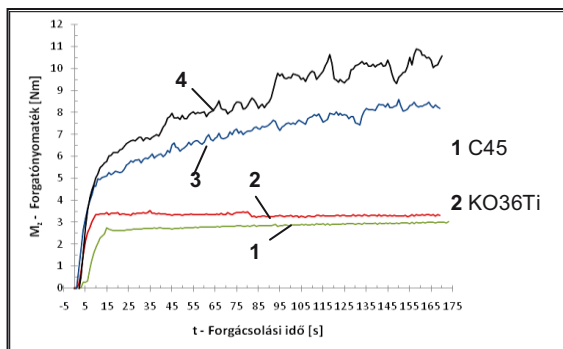
Elsőként a forgácsolási nyomaték alakulását vizsgáltuk a négy, előbb felsorolt anyagra. A kapott eredményeket a 1. ábra szemlélteti. Látható, hogy a Ni-bázisú szuperötvözetek horonymarásakor a referenciaanyagokhoz viszonyított nyomaték magasan kezd, intenzíven emelkedik, és a mért értékek erősen szórnak, ami az fokozott szerszámkopás és az intenzív rezgés következménye. GTD111 produkálja a legmagasabb értékeket, és ha ez elérjük az  $M_c = 10$  Nm-t, tapasztalat szerint a szerszám nagy valószínűséggel eltörik. 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 7. Táblázat a kísérletek során mért nyomatékokat és hőmérsékleteket tartalmazza abszolút és a C45-re vonatkoztatott százalékos formában, melyek átlaga a K mutatószám.

#### 6. Értékelés és következtetések

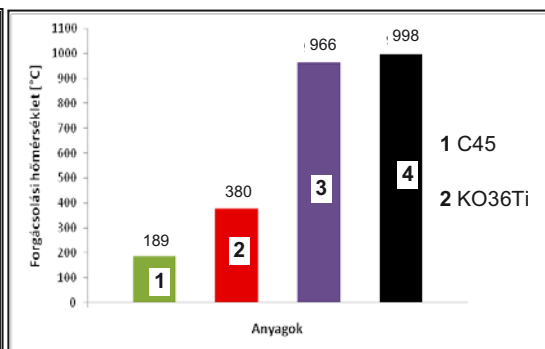
Gyakran előfordul, hogy valamely anyagot „jól forgácsolható” vagy „rosszul forgácsolható” jelzővel illetünk anélkül, hogy konkrét ismereteink lennének az anyagjellemzőkről, vagy a technológiai körülményekről. Az így kialakított vélemény csak hozzávetőleges lehet,

de az anyag mechanikai és hőtani jellemzőivel képzett ún. hibrid mutatószám (H) – összevetve a technológiai ajánlások alapján képzettel (A) – megbízható támpontként szolgálhat. A kísérleti eredmények mutatószámainak (K) alakulása

azonos jellegű az előbbiekkal, de a számszerű adatokban szignifikáns eltérés mutatkozik (3. ábra), amit a még hiányzó és pótolandó éltartam-mérések adatai nagy valószínűséggel az előbbiekhöz hasonló irányba módosítanak.



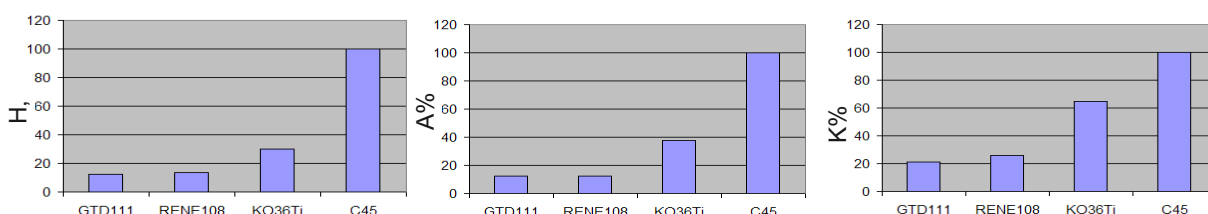
1. ábra. A forgácsolási nyomaték



2. ábra. A forgácsolóhőmérséklet

7. táblázat. A C45-re vonatkoztatott forgácsolhatósági mutatószámok a kísérletek alapján

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



3. ábra. A hibrid mutatószámok (H), az ajánlott technológiai adatok (A) és a kísérleti eredményekből (K) képzett, a C45 jelű acélra vonatkozó relatív forgácsolhatósági mutatószámok

### 7. Irodalomjegyzék

- [1] Dr. Pálmai Z. : Fémek forgácsolhatósága. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1980.
- [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] K. Raznjevic: Hőtechnikai táblázatok. Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1964.
- [5] [www.walter-tools.com/.../catalogues/en-gb/general-catalogue -2012-en.pdf](http://www.walter-tools.com/.../catalogues/en-gb/general-catalogue -2012-en.pdf)